

Print ISSN 1991-6639
Online ISSN 2949-1940

Том 27 № 2



2025

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

ИЗВЕСТИЯ КАБАРДИНО-БАЛКАРСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РАН



DOI: 10.35330/1991-6639

12+

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр
«Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук» (КБНЦ РАН)

Научный журнал

ИЗВЕСТИЯ КАБАРДИНО-БАЛКАРСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РАН

Том 27 № 2 2025

Сквозной номер выпуска – 124

Журнал основан в 1998 г. Выходит 6 раз в год

ISSN 1991-6639 (печатная версия), ISSN 2949-1940 (электронная версия)

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-14936 от 20 марта 2003 г. выдано Министерством
Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

360010, Российская Федерация, Кабардино-Балкарская Республика, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2
E-mail: ired07@mail.ru

© КБНЦ РАН, 2025

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation
Federal State Budgetary Scientific Establishment “Federal Scientific Center
“Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences” (KBSC RAS)

Science journal

NEWS OF THE KABARDINO-BALKARIAN SCIENTIFIC CENTER OF RAS

Vol. 27 No. 2 2025

Continuous issue number – 124

The journal was founded in 1998, 6 issues per year

ISSN 1991-6639 (print), ISSN 2949-1940 (online)

Certificate of registration PI No. 77-14936 March 20, 2003 issued by the Ministry
of Russian Federation of Press, Broadcasting and Mass Communications

ADDRESS OF THE EDITORIAL OFFICE:

360010, Russian Federation, Kabardino-Balkarian, Nalchik, 2 Balkarov street
E-mail: ired07@mail.ru

© KBSC RAS, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН Том 27 № 2 2025

<u>Редакционная коллегия</u>	5
---	---

Информационные технологии и телекоммуникации

Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

Построение модели машинного обучения для прогнозирования мошеннических транзакций <i>А. Ф. КОНСТАНТИНОВ, Л. П. ДЬЯКОНОВА</i>	11
Интеллектуальная рекомендательная система для защиты яблоневых садов в КБР <i>А. З. ТЕМРОКОВ, К. Ч. БЖИХАТЛОВ</i>	23

Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

Роль технологий искусственного интеллекта в цифровой трансформации российского производства <i>Н. А. РЕБУС, И. Г. БЛАГОВЕЩЕНСКИЙ, О. В. РАТАНОВА, Ф. А. МАСТЯЕВ</i>	37
Применение миварных экспертных систем для диагностики бактериальной устойчивости к антибиотикам <i>Н. Ч. САЛАХУТДИНОВА, О. О. ВАРЛАМОВ</i>	55

Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования

Компьютерное моделирование в среде Maple динамических процессов в условиях неопределенности на примере задачи метеорологии <i>О. В. КУДРИНСКАЯ, Р. И. ПАРОВИК</i>	74
---	----

Информатика и информационные процессы

О применении обучения с подкреплением в задаче выбора оптимальной траектории движения <i>М. Г. ГОРОДНИЧЕВ</i>	86
Модели и методы глубокого обучения в задачах распознавания и классификации медицинских изображений <i>И. А. ПШЕНОКОВА, М. Р. КИЯСОВ</i>	103

Агрономия, лесное и водное хозяйство

Общее земледелие и растениеводство

Влияние различных приемов воздействия на побеги голубики высокорослой при размножении отводками <i>Е. М. ЕГОРОВА, Ф. Д. ТАУМУРЗАЕВА</i>	113
Продуктивность сортов суданской травы на фоне применения регуляторов роста <i>О. Д. КАЧАРОВ, М. Р. МУСАЕВ</i>	122

Динамика запасов фосфора в почве в связи с интенсивным использованием пашни <i>М. С. СИДАКОВА, Е. М. ЕГОРОВА, Р. А. ТИЕВ, А. Ю. КИШЕВ</i>	130
Особенности роста, развития и формирования урожайности сортов кориандра <i>Ж. А. ШАОВА, В. Н. КОСАРЕВ, М. С. ГАЛИЧЕВА</i>	139

Экономика

Региональная и отраслевая экономика

Литературный обзор по устойчивому развитию цифровых логистических сетей в сфере сельского хозяйства <i>А. Н. МЕКОНИН, С. Е. БАРЫКИН</i>	150
Пространственная организация сельского хозяйства как основа рационального размещения и специализации <i>Л. П. СИЛАЕВА</i>	163
Разработка российско-китайской омниканальной логистической сети продукции биотоплива <i>В. ЧЖАН, С. Е. БАРЫКИН</i>	173

Менеджмент

Экономические последствия коррупции: влияние на инвестиционный климат и развитие бизнеса <i>М. И. ЕЛАЕВ</i>	184
---	-----

Юбилеры

<i>Валерию Дударовичу Дзидзоеву – 75 лет</i>	199
--	-----

Правила для авторов журнала	202
--	-----

CONTENTS

News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS Vol. 27 No. 2 2025

Editorial Board	5
------------------------------	---

Information Technologies and Telecommunications

System analysis, management and information processing, statistics

Building a machine learning model for predicting fraudulent transactions <i>A.F. KONSTANTINOV, L.P. DYAKONOVA</i>	11
--	----

Intelligent recommendation system for apple orchard protection in the Kabardino-Balkarian Republic <i>A.Z. TEMROKOV, K.Ch. BZHIKHATLOV</i>	23
--	----

Automation and control of technological processes and productions

The role of artificial intelligence technologies in digital transformation of Russian production <i>N.A. REBUS, I.G. BLAGOVESHCHENSKIY, O.V. RATANOVA, F.A. MASTYAEV</i>	37
--	----

The use of mivar expert systems for diagnosis of bacterial antibiotic resistance <i>N.Ch. SALAKHUTDINOVA, O.O. VARLAMOV</i>	55
--	----

Computer modeling and design automation

Computer modeling in the Maple environment of dynamic processes under uncertainty conditions using a meteorological problem as an example <i>O.B. KUDRINSKAYA, R.I. PAROVIK</i>	74
---	----

Informatics and information processes

On the application of reinforcement learning in the task of choosing the optimal trajectory <i>M.G. GORODNICHEV</i>	86
---	----

Models and methods of deep learning in medical image recognition and classification tasks <i>I.A. PSHENOKOVA, M.R. KIYASOV</i>	103
--	-----

Agronomy, Forestry and Water Management

General farming and crop production

Propagation of tall blueberries by rooting layers in the conditions of the foothill zone of the KBR <i>E.M. EGOROVA, F.D. TAUMURZAYEVA</i>	113
--	-----

Productivity of varieties of Sudanese grass against the background of the use of growth regulators <i>O.D. KACHAROV, M.R. MUSAEV</i>	122
--	-----

Dynamics of phosphorus reserves in the soil due to intensive use of arable land <i>M.S. SIDAKOVA, E.M. EGOROVA, R.A. TIEV, A.Yu. KISHEV</i>	130
Features of growth, development and yield formation of coriander varieties <i>Z.A. SHAOVA, V.N. KOSAREV, M.S. GALICHEVA</i>	139

Economy

Regional and sectoral economics

A literature review on sustainability concept of digital logistics networks in agriculture <i>A.N. MEKONIN, S.E. BARYKIN</i>	150
Spatial organization of agriculture as a basis for rational placement and specialization <i>L.P. SILAEVA</i>	163
Developing Russian-Chinese omnichannel logistics network of biofuel products <i>W. ZHANG, S.E. BARYKIN</i>	173

Management

Economic consequences of corruption: impact on investment climate and business development <i>M.I. ELAEV</i>	184
--	-----

Anniversaries

<i>Valery Dudarovich Dzidzoev is 75 years old</i>	199
---	-----

Publishing regulations for the authors	202
---	-----

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор:

Иванов Петр Мацович, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, Кабардино-Балкарский научный центр РАН, Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, Россия

Заместитель главного редактора:

Улаков Махти Зейтунович, доктор филологических наук, профессор, Институт гуманитарных исследований – филиал КБНЦ РАН, Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, Россия

Ответственный секретарь:

Энеева Лиана Магометовна, кандидат физико-математических наук, Институт прикладной математики и автоматизации – филиал КБНЦ РАН, Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, Россия

Члены редакционной коллегии:

Абазов Алексей Хасанович, доктор исторических наук, Институт гуманитарных исследований – филиал КБНЦ РАН, Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, Россия

Адуков Рухман Хасанович, доктор экономических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, Федеральный научный центр аграрной экономики и социального развития сельских территорий – Всероссийский научно-исследовательский институт экономики сельского хозяйства, Москва, Россия

Алтухов Анатолий Иванович, академик РАН, доктор экономических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, Федеральный научный центр аграрной экономики и социального развития сельских территорий – Всероссийский научно-исследовательский институт экономики сельского хозяйства, Москва, Россия

Амирханов Хизри Амирханович, академик РАН, доктор исторических наук, профессор, Институт истории, археологии и этнографии Дагестанского федерального исследовательского центра РАН, Махачкала, Республика Дагестан, Россия

Бабенко Людмила Клементьевна, доктор технических наук, профессор, Таганрогский технологический институт ЮФУ, Таганрог, Россия

Барыкин Сергей Евгеньевич, доктор экономических наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Высшая школа сервиса и торговли, Санкт-Петербург, Россия

Бижоев Борис Чамалович, доктор филологических наук, Институт гуманитарных исследований – филиал КБНЦ РАН, Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, Россия

Гукеев Владимир Мицахович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Институт сельского хозяйства – филиал КБНЦ РАН, Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, Россия

Дзамихов Касболат Фицевич, доктор исторических наук, профессор, Институт гуманитарных исследований – филиал КБНЦ РАН, Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, Россия

Дзюба Владимир Алексеевич, доктор биологических наук, профессор, неаффилированный автор, Краснодар, Россия

Дохолян Сергей Владимирович, доктор экономических наук, профессор, Федеральный научно-исследовательский социологический центр РАН, Москва, Россия

Завалин Алексей Анатольевич, академик РАН, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, ВНИИ агрохимии им. Д. Н. Прянишникова, Москва, Россия

Закшевский Василий Георгиевич, академик РАН, доктор экономических наук, профессор, Научно-исследовательский институт экономики и организации агропромышленного комплекса Центрально-Черноземного района РФ, Воронеж, Россия

Иванов Анатолий Беталович, доктор биологических наук, профессор, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х. М. Бербекова, Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, Россия

Кибилов Алихан Яковлевич, доктор экономических наук, профессор, Федеральный научный центр аграрной экономики и социального развития сельских территорий – Всероссийский научно-исследовательский институт экономики сельского хозяйства, Москва, Россия

Клейнер Георгий Борисович, член-корреспондент РАН, доктор экономических наук, профессор, Центральный экономико-математический институт РАН, Москва, Россия

Комков Николай Иванович, доктор экономических наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН, Санкт-Петербург, Россия

Котляков Владимир Михайлович, академик РАН, доктор географических наук, профессор, Институт географии РАН, Москва, Россия

Кузьминов Валерий Васильевич, доктор физико-математических наук, Баксанская нейтринная обсерватория – центр коллективного пользования Института ядерных исследований РАН, Нейтрино, Приэльбрусье, Кабардино-Балкарская Республика, Россия

Кусраев Анатолий Георгиевич, доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, Владикавказский научный центр РАН, Владикавказ, РСО–Алания, Россия

Мазлоев Виталий Зелимханович, доктор экономических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, Федеральный научный центр аграрной экономики и социального развития сельских территорий – Всероссийский научно-исследовательский институт экономики сельского хозяйства, Москва, Россия

Малкандуев Хамид Алиевич, доктор сельскохозяйственных наук, Институт сельского хозяйства – филиал КБНЦ РАН, Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, Россия

Мамбетова Фатимат Абдуллаховна, доктор экономических наук, доцент, Институт информатики и проблем регионального управления – филиал КБНЦ РАН, Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, Россия

Маслиенко Любовь Васильевна, доктор биологических наук, Всероссийский научно-исследовательский институт масличных культур им. В. С. Пустовойта, Краснодар, Россия

Матишов Геннадий Григорьевич, академик РАН, доктор географических наук, профессор, Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону, Россия

Махощева Салима Александровна, доктор экономических наук, Институт информатики и проблем регионального управления – филиал КБНЦ РАН, Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, Россия

Нагоев Залимхан Вячеславович, кандидат технических наук, Кабардино-Балкарский научный центр РАН, Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, Россия

Нечаев Василий Иванович, доктор экономических наук, профессор, Федеральный научный центр аграрной экономики и социального развития сельских территорий – Всероссийский научно-исследовательский институт экономики сельского хозяйства, Москва, Россия

Попков Юрий Соломонович, академик РАН, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление», Москва, Россия

Псху Арсен Владимирович, доктор физико-математических наук, доцент, Институт прикладной математики и автоматизации – филиал КБНЦ РАН, Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, Россия

Пшихопов Вячеслав Хасанович, доктор технических наук, профессор, Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

Ронжин Андрей Леонидович, доктор технических наук, профессор, профессор РАН, директор Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра РАН, Санкт-Петербург, Россия

Рехвиашвили Серго Шотович, доктор физико-математических наук, Институт прикладной математики и автоматизации – филиал КБНЦ РАН, Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, Россия

Савин Игорь Юрьевич, академик РАН, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Российский университет дружбы народов, департамент рационального природопользования Института экологии, Москва, Россия

Семин Александр Николаевич, академик РАН, доктор экономических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, Уральский государственный университет, Институт мировой экономики, Екатеринбург, Россия

Симаков Евгений Алексеевич, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Всероссийский научно-исследовательский институт картофельного хозяйства имени А. Г. Лорха, Москва, Россия

Скляров Игорь Юрьевич, доктор экономических наук, профессор, Ставропольский государственный аграрный университет, Ставрополь, Россия

Склярова Юлия Михайловна, доктор экономических наук, профессор, Ставропольский государственный аграрный университет, Ставрополь, Россия

Стемпковский Александр Леонидович, академик РАН, доктор технических наук, профессор, Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН, Москва, Россия

Супрунов Анатолий Иванович, доктор сельскохозяйственных наук, доцент, Национальный центр зерна им. П. П. Лукьяненко, Краснодар, Россия

Темботова Фатимат Асланбиевна, член-корреспондент РАН, доктор биологических наук, профессор, Институт экологии горных территорий им. А. К. Темботова РАН, Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, Россия

Трамова Азиза Мухамадияевна, доктор экономических наук, доцент, Российский экономический университет им. Г. В. Плеханова, Москва, Россия

Филюшин Михаил Александрович, кандидат биологических наук, Федеральный исследовательский центр «Фундаментальные основы биотехнологии» РАН, Москва, Россия

Чочаев Алим Хусеевич, доктор экономических наук, профессор, Федеральное государственное унитарное предприятие «Агронауцсервис», Москва, Россия

Шевхужев Анатолий Фоадович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр, Михайловск, Россия

Шогенов Юрий Хасанович, академик РАН, доктор технических наук, Отделение сельскохозяйственных наук РАН, Москва, Россия

Янбых Рената Геннадьевна, член-корреспондент РАН, доктор экономических наук, доцент, профессор РАН, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

EDITORIAL BOARD

Editor in Chief:

Petr M. Ivanov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Merited Scientist of the Russian Federation, Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, Russia

Deputy Editor in Chief:

Makhti Z. Ulakov, Doctor of Philology, Professor, Institute for Humanitarian Research – branch of KBSC RAS, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, Russia

Responsible Secretary:

Liana M. Eneeva, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Institute of Applied Mathematics and Automation – branch of KBSC RAS, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, Russia

Members of the Editorial Board:

Aleksey Kh. Abazov, Doctor of Historical Sciences, Institute for Humanitarian Research – branch of KBSC RAS, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, Russia

Rukhman Kh. Adukov, Doctor of Economics, Professor, Merited Scientist of the Russian Federation, Federal Research Center for Agricultural Economics and Social Development of Rural Territories – All-Russian Research Institute of Economics of Agriculture, Moscow, Russia

Anatoly I. Altukhov, Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Economics, Professor, Merited Scientist of the Russian Federation, Federal Research Center for Agricultural Economics and Social Development of Rural Territories – All-Russian Research Institute of Economics of Agriculture, Moscow, Russia

Khizri A. Amirkhanov, Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Historical Sciences, Professor, Institute of History, Archeology and Ethnography of the Dagestan Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Republic of Dagestan, Russia

Lyudmila K. Babenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, Taganrog Institute of Technology, Southern Federal University, Taganrog, Russia

Sergey E. Barykin, Doctor of Economics, Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Higher School of Service and Trade, St. Petersburg, Russia

Boris Ch. Bizhiov, Doctor of Philology, Institute for Humanitarian Research – branch of KBSC RAS, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, Russia

Vladimir M. Gukezhev, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Institute of Agriculture – branch of KBSC RAS, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, Russia

Kasbolat F. Dзамikhov, Doctor of Historical Sciences, Professor, Institute for Humanitarian Research – branch of KBSC RAS, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, Russia

Vladimir A. Dzyuba, Doctor of Biological Sciences, Professor, nonaffiliated author, Krasnodar, Russia

Sergey V. Dokholyan, Doctor of Economics, Professor, Federal Center of Theoretical and Applied Sociology of RAS, Moscow, Russia

Aleksey A. Zavalin, Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, All-Russian Research Institute of Agrochemistry named after D.N. Pryanishnikov, Moscow, Russia

Vasily G. Zakshevsky, Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Economics, Professor, Research Institute for Economics and Organization of the Agro-Industrial Complex of the Central Black Earth Region of the Russian Federation, Voronezh, Russia

Anatoly B. Ivanov, Doctor of Biological Sciences, Professor, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, Russia

Alikhan Ya. Kibirov, Doctor of Economics, Professor, Federal Scientific Center for Agricultural Economics and Social Development of Rural Territories – All-Russian Research Institute of Agricultural Economics, Moscow, Russia

Georgy B. Kleiner, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Economics, Professor, Central Economics and Mathematics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Nikolai I. Komkov, Doctor of Economics, Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Institute of Economic Forecasting of RAS, St. Petersburg, Russia

Vladimir M. Kotlyakov, Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Geographical Sciences, Professor, Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Valery V. Kuzminov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Baksan Neutrino Observatory – center of collective use of Institute for Nuclear Research, Neutrino, Elbrus region, Kabardino-Balkarian Republic, Russia

Anatoly G. Kusraev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Merited Scientist of the Russian Federation, Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Vladikavkaz, North Ossetia – Alania, Russia

Vitaly Z. Mazloev, Doctor of Economics, Professor, Merited Scientist of the Russian Federation, Federal Research Center for Agrarian Economics and Social Development of Rural Territories – All-Russian Research Institute of Agricultural Economics, Moscow, Russia

Khamid A. Malkanduev, Doctor of Agricultural Sciences, Institute of Agriculture – branch of KBSC RAS, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, Russia

Fatimat A. Mambetova, Doctor of Economics, Associate Professor, Institute of Informatics and Regional Management Problems – branch of KBSC RAS, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, Russia

Lyubov V. Maslienko, Doctor of Biological Sciences, All-Russian Research Institute of Oilseeds named after V.S. Pustovoit, Krasnodar, Russia

Gennady G. Matishov, Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Geography, Professor, Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russia

Salima A. Makhosheva, Doctor of Economics, Institute of Informatics and Regional Management Problems – branch of KBSC RAS, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, Russia

Zalimkhan V. Nagoev, Candidate of Technical Sciences, Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, Russia

Vasily I. Nechaev, Doctor of Economics, Professor, Federal Research Center for Agrarian Economics and Social Development of Rural Territories – All-Russian Research Center Institute of Agricultural Economics, Moscow, Russia

Yuri S. Popkov, Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Merited Scientist of the Russian Federation, Federal Research Center “Informatics and Control”, Moscow, Russia

Arsen V. Pskhu, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Institute of Applied Mathematics and Automation – branch of KBSC RAS, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, Russia

Vyacheslav Kh. Pshikhopov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

Andrey L. Ronzhin, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of the Russian Academy of Sciences, Director of the St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

Sergo Sh. Rekhviashvili, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Institute of Applied Mathematics and Automation – Branch of KBSC RAS, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, Russia

Igor Yu. Savin, Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Peoples Friendship University of Russia, Department of Environmental Management of the Institute of Ecology, Moscow, Russia

Alexander N. Semin, Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Economics, Professor, Ural State University, Institute of World Economy, Department of Strategic and Production Management, Ekaterinburg, Russia

Evgeny A. Simakov, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, All-Russian Research Institute of Potato Economy named after A.G. Lorkh, Moscow, Russia

Igor Yu. Sklyarov, Doctor of Economics, Professor, Stavropol State Agrarian University, Stavropol, Russia

Yulia M. Sklyarova, Doctor of Economics, Professor, Stavropol State Agrarian University, Stavropol, Russia

Alexander L. Stempkovsky, Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Institute for Design Problems in Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Anatoly I. Suprunov, Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor, National Grain Center named after P.P. Lukyanenko, Krasnodar, Russia

Fatimat A. Tembotova, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Biological Sciences, Professor, Institute of Ecology of Mountain Territories named after A.K. Tembotov of RAS, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, Russia

Aziza M. Tramova, Doctor of Economics, Associate Professor, Russian University of Economics named after G.V. Plekhanov, Moscow, Russia

Mikhail A. Filyushin, Candidate of Biological Sciences, Federal Research Center “Fundamental Foundations of Biotechnology” of RAS, Moscow, Russia

Alim Kh. Chochaev, Doctor of Economics, Professor, Federal State Unitary Enterprise “Agronauchservis”, Moscow, Russia

Anatoly F. Shevkhuzhev, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, North Caucasian Federal Scientific Agrarian Center, Mikhailovsk, Russia

Yuri Kh. Shogenov, Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Department of Agricultural Sciences of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Renata G. Yanbykh, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Economic Sciences, Professor, HSE University, Moscow, Russia

УДК 004.89

Научная статья

DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-2-11-22

EDN: EWHPZV

Построение модели машинного обучения для прогнозирования мошеннических транзакций

А. Ф. Константинов✉, Л. П. Дьяконова

Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова
115054, Россия, Москва, Стремянный переулок, 36

Аннотация. В статье представлена разработка модели машинного обучения для прогнозирования мошеннических транзакций на примере транзакционных данных банка. Рассмотрены особенности кодирования категориальных переменных, связанные с наличием времени в транзакционных данных, чтобы избежать утечек информации. Проведены эксперименты по применению баггинга (bootstrap aggregating) и созданию дополнительных переменных на основе их вклада в итоговый прогноз с применением Shapley values. Рассмотрены показатели качества модели машинного обучения и проведен их анализ.

Ключевые слова: мошеннические транзакции, catboost, кодирование категориальных переменных, catboost_encoder, target_encoder, bagging, создание переменных, Shapley values

Поступила 16.01.2025, одобрена после рецензирования 27.01.2025, принята к публикации 10.03.2025

Для цитирования. Константинов А. Ф., Дьяконова Л. П. Построение модели машинного обучения для прогнозирования мошеннических транзакций // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2025. Т. 27. № 2. С. 11–22. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-2-11-22

MSC: 90C99

Original article

Building a machine learning model for predicting fraudulent transactions

A.F. Konstantinov✉, L.P. Dyakonova

Plekhanov Russian University of Economics
115054, Russia, Moscow, 36 Stremyannyy lane

Abstract. The article presents development of a machine learning model for predicting fraudulent transactions using transactional data from a bank. It discusses the features of encoding categorical variables related to the presence of time in the transactional data to avoid information leakage. Additionally, experiments were conducted on the application of bagging and the creation of additional variables based on their contribution to the final prediction using Shapley values. The quality metrics of the machine learning model are examined and analyzed.

Keywords: fraudulent transactions, catboost, encoding categorical variables, catboost_encoder, target_encoder, bagging, variables creation, Shapley values

Submitted 16.01.2025, approved after reviewing 27.01.2025, accepted for publication 10.03.2025

For citation. Konstantinov A.F., Dyakonova L.P. Building a machine learning model for predicting fraudulent transactions. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2025. Vol. 27. No. 2. Pp. 11–22. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-2-11-22

ВВЕДЕНИЕ

Финансовые организации ежедневно анализируют, оценивают и минимизируют большое количество рисков, связанных с финансовыми активами и обязательствами организаций. Основной целью управления финансовыми рисками является защита организаций от финансовых потерь, возникающих из-за изменений внешней среды, а также поддержание финансовой устойчивости и увеличение прибыли организаций.

Модели искусственного интеллекта (ИИ) широко применяются в управлении финансовыми рисками. Техники машинного обучения, используемые для управления финансовым риском, приведены в таблице 1 [1].

Таблица 1. Техники машинного обучения, используемые для управления финансовым риском

Table 1. Machine learning techniques for financial risk management application

Метод обучения	Задача обучения	Приложение для управления финансовым риском
Обучение с учителем	Классификация	Поиск мошенничества
		Оптимизация портфолио
		Кредитный скоринг и прогноз банкротства
	Регрессия	Прогноз волатильности
		Анализ чувствительности
		Моделирование претензий
		Резервирование потерь
		Моделирование смертности
Обучение без учителя	Кластеризация	Ценообразование в страховании
		Анализ чувствительности
		Кредитный скоринг и прогноз банкротства
	Определение аномалий	Поиск мошенничества
	Снижение размерности	Андеррайтинг в страховании
		Моделирование смертности
Обучение с подкреплением		Оптимизация портфолио
Обучение с частичным наблюдением		Анализ чувствительности

При управлении финансовыми рисками обычно рассматривают:

- риски, связанные с рынками (анализ чувствительности, оптимизация портфолио, предсказание волатильности);
- кредитные риски (кредитный скоринг, предсказание дефолта или банкротства);
- страхование и демографические риски (моделирование претензий, резервирование потерь, предсказание смертности, андеррайтинг в страховании);
- операционные риски (поиск мошенничества).

В данной работе будут рассматриваться мошеннические транзакции. В общей классификации финансовых рынков они относятся к операционным рискам.

В дополнение к рассмотренным техникам машинного обучения, используемым для управления финансовым риском, необходимо указать на особенность финансовых данных – запрет на разглашение персональной информации о клиентах и их операциях. В своей статье [2] Т. Awosika и соавт. рассматривают применение федеративного обучения [3] при обнаружении финансового мошенничества. При применении федеративного обучения модель обучается на данных, распределенных между разными финансовыми организациями, без необходимости централизованного сбора данных. Вместо передачи данных для обучения в общий сервер модели ИИ обучаются в каждой финансовой организации независимо и передаются непосредственно бинарные файлы моделей ИИ (веса коэффициентов моделей). Далее веса моделей агрегируются и обратно направляются в финансовые организации. Выполняется несколько итераций данного процесса обучения до достижения максимально возможных показателей качества центральной модели ИИ.

В статье [4] А. А. Ali и соавт. проводят исследования, связанные с прогнозированием мошенничества с финансовой отчетностью. Лучшие результаты по сравнению с классическими моделями машинного обучения (логистическая регрессия, деревья решений, машины опорных векторов, AdaBoost и случайный лес) показывают модели на основе бустинга (XGBoost) с проведенными мероприятиями по снижению дисбаланса классов и автоматизированной настройкой гиперпараметров модели. К применению ансамблевых бустинговых моделей следует подходить с особой осторожностью. В основе бустинговых моделей находятся неглубокие деревья решений. В случае сдвига входящих переменных (стоимостные показатели, старение населения) правила разбиения неглубоких деревьев перестают работать, так как, например, автомобиль стоимостью 2 млн руб. в 2020 г. (люксовый европейский автомобиль) существенно отличается от автомобиля за 2 млн руб. в 2025 г. (дешевый китайский кроссовер), и правила разбиения наблюдений по стоимости автомобиля не будут учитывать быстрое изменение в окружающей среде. В связи с этим при использовании бустинговых моделей необходимо проводить мероприятия по предупреждению сдвигов в данных.

Временная структура финансовых данных характерна в том числе для информации о мошеннических транзакциях. Со временем изменяются как способы мошенничества, так и входящие в модель ИИ данные (дрифт входных данных). К. Не и соавт. [5] получили лучшее качество прогнозирования финансовых временных рядов с использованием ансамблевой модели глубокого обучения (Convolutional Neural Network (CNN) – Long Short-Term Memory (LSTM) – AutoRegressive Moving Average (ARMA)) по сравнению с отдельным применением моделей (ARMA, Multi-Layer Perceptron (MLP), LSTM, CNN). Модель CNN-LSTM используется для моделирования данных в пространственно-временной плоскости. Модель ARMA используется для учета автокорреляции в данных. Эти модели объединены в ансамблевой структуре для моделирования смеси линейных и нелинейных характеристик данных в финансовых временных рядах. Таким образом, наблюдается тенденция к использованию ансамблей моделей ИИ, позволяющих решить целый ряд проблем, связанных с особенностями финансовых данных, и достичь лучших результатов.

Цели и задачи исследования. Целью исследования является применение алгоритмов ИИ для обнаружения мошеннических финансовых транзакций и определение моделей, дающих лучшие значения метрик качества. В задачи исследования входит оценка эффективности применения баггинга и создания дополнительных переменных на основе их

вклада в итоговый прогноз с применением Shapley values, оценка и анализ показателей качества классификации.

Методы исследования: анализ эффективности применения дополнительных техник и оценка вклада каждой переменной в итоговый прогноз с применением Shapley values.

ОПИСАНИЕ НАБОРА ДАННЫХ

Набор данных «Transactions Data Bank. Fraud Detection¹ (Данные транзакций банка. Обнаружение мошенничества)» представляет информацию о 1048574 транзакциях банка за период с 01.04.2012 по 31.10.2014. Основная цель – определить, является ли транзакция мошеннической. Набор данных содержит следующие поля:

- дата транзакции (Date);
- номер аккаунта (nameOrig);
- количество денег в транзакции (amount);
- количество денег до транзакции (oldbalanceOrig);
- количество денег после транзакции (newbalanceOrig);
- город, в котором транзакция производится (City);
- тип транзакции (перевод, внесение денег, получение денег) (type);
- тип карты клиента (Card Type);
- цель транзакции (Exp Type);
- пол (Gender);
- метка мошенничества (isFraud).

Доля мошеннических транзакций составляет 16,8 % (175785 из 1048574).

В наборе данных рассмотрено 986 городов Индии. Количество наблюдений равно 1048574 для всех полей.

В таблице 2 приведены базовые статистики категориальных переменных

Таблица 2. Базовые статистики категориальных переменных

Table 2. Basic statistics for the categorical variables

Наименование поля	Уникальных	Первое значение	Частота
Дата (Date)	1326	26-Apr-14	1167
Номер аккаунта (nameOrig)	1048316	C1900095842	2
Город (City)	986	Bengaluru, India	143733
Тип транзакции (type)	5	CASH_OUT	373641
Тип карты клиента (Card Type)	6	Silver	275540
Цель транзакции (Exp Type)	9	Food	220115
Пол (Gender)	2	F	551182

В таблице 3 приведены базовые статистики числовых переменных.

¹Ссылка на набор данных: <https://www.kaggle.com/datasets/qusaybtoush1990/transactions-data-bank-fraud-detection>

Таблица 3. Базовые статистики числовых переменных**Table 3.** Basic statistics for the numerical variables

Наименование поля	Количество наблюдений	Среднее значение	Стандартное отклонение	Минимум	25 % перцентиль	50 % перцентиль	75 % перцентиль	Максимум
Количество денег в транзакции (amount)	1048574	38 028	110 517	0	647	8 263	23 650	10 000 000
Количество денег до транзакции (oldbalanceOrg)	1048574	880 198	2 969 968		4 344	36 539	136 643	38 900 000
Количество денег после транзакции (newbalanceOrig)	1048574	842 171	2 936 373		918	20 552	90 307	38 893 191
Метка мошенничества (isFraud)	1048574	0,168	0,374		0	0	0	1

СХЕМА ВАЛИДАЦИИ

Для того чтобы показатели качества не зависели от единовременного разделения данных на тренировочные и тестовые, проведено разделение данных методом кросс-валидации StratifiedShuffleSplit на тренировочные (50 %) и тестовые (50 %) наборы. Далее для каждого набора тренировочных данных данные повторно 5 раз разделялись на тренировочный (80 %) и валидационный (20 %) набор данных с помощью метода кросс-валидации kFold.

ПРИМЕНЯЕМЫЕ МОДЕЛИ ИИ

В настоящее время наилучшие показатели качества для табличных данных показывают модели бустинга. Бустинг представляет собой метод ансамблевого машинного обучения, который объединяет прогнозы слабых (неглубоких) моделей машинного обучения в одну сильную. При обучении бустинга каждая следующая модель исправляет ошибки предыдущих моделей.

Наиболее популярными алгоритмами бустинга являются CatBoost, XGBoost, LightGBM. При сопоставимых показателях качества библиотека CatBoost (Categorical boosting) специально разработана для работы с категориальными переменными и поддерживает работу с категориальными переменными «из коробки», что упрощает процесс проведения экспериментов. По утверждению разработчиков, CatBoost статистически значительно превосходит Xgboost и LightGBM [6].

Дополнительно необходимо отметить важные особенности кодирования категориальных переменных. Catboost хорошо показывает себя при работе с редкими категориями несбалансированных классов, характерными для финансовых данных. При кодировании категориальных переменных методами One-Hot-encoding² или Label-encoding³ категории с небольшим количеством наблюдений укрупняются и объединяются в большую категорию «Прочее», при этом редкие категории «забываются» алгоритмами.

²One-Hot-encoding создает дополнительные столбцы по количеству уникальных значений категориальных переменных и помещает в него значение 1 или 0 (есть категория в строке или нет). Часто редкие категории объединяются в 1 столбец «Прочее».

³Label-encoding каждой категории присваивается отдельное число. При этом модель ИИ может обнаружить связи там, где их нет (например, 1>2). Также часто редкие категории объединяются в 1 столбец «Прочее».

Метод кодирования категориальных переменных Target_encoder [7] позволяет решить проблему «забывания» редких категорий. Перед началом обучения на тренировочных данных для каждого значения категориальной переменной рассчитывается вероятность положительного класса, и само категориальное значение заменяется на эту вероятность. Если категориальная переменная имеет небольшое число возможных значений (разовые категории), то ее значение заменяется на среднюю вероятность целевой переменной по всей обучающей выборке. Если же категориальная переменная встречается в большом числе наблюдений, то применяется среднее по значению категориальной переменной на данных для обучения, а не по всем наблюдениям, используемым для обучения. Баланс между средним по значению категории и средним по всем тренировочным данным настраивается с помощью параметра сглаживания (smoothing) метода кодирования Target_encoder.

Транзакционные данные имеют следующую особенность: при разделении данных случайным образом на тренировочные и тестовые при расчете среднего по категории в расчет средней вероятности положительного класса попадают данные будущих периодов, что создает утечку, связанную с изменением во времени частоты мошеннических транзакций. В отличие от остальных моделей машинного обучения Catboost имеет встроенный кодировщик категориальных переменных Catboost_encoder, который является вариацией Target_encoder. Достоинством метода кодирования категориальных переменных Catboost_encoder является то, что в нем решена проблема утечки при кодировании категориальных переменных за счет учета времени появления категориальной переменной. При кодировании категориальных переменных значение целевой переменной (частота положительного класса) вычисляется только по предшествующим во времени наблюдениям.

БАЗОВАЯ МОДЕЛЬ (КОД МОДЕЛИ: BASE)

Учитывая описанные выше достоинства модели CatboostClassifier [8] (Categorical boosting Classifier), в нашем исследовании она была выбрана в качестве базовой модели ИИ.

Сама модель CatboostClassifier представляет собой ансамбль решающих деревьев небольшой глубины, причем на каждой последующей итерации модель учится снижать псевдоошибки прогнозов предыдущих итераций деревьев.

При обучении модели были установлены следующие гиперпараметры: число итераций ‘количество итераций’(iterations) = 3000, ‘количество итераций для ранней остановки’(early_stopping_rounds) = 100, ‘набор данных для остановки обучения’(eval_set) = (X_val, y_val). Параметр ‘количество итераций’(iterations) установлен заранее завышенным. Catboost автоматически рассчитывает параметр, регулирующий скорость обучения ‘скорость обучения’(learning_rate) с учетом параметра ‘количество итераций’(iterations) и особенностей набора данных. При этом обучение остановится при отсутствии роста показателя качества на числе итераций, установленном в параметре ‘количество итераций для ранней остановки’(early_stopping_rounds) = 100. Таким образом достигается оптимальное соотношение количества итераций и темпа обучения. Точка (порог отсечения) отнесения к положительному классу – 0,5 по умолчанию.

МОДЕЛЬ БАГГИНГА (КОД МОДЕЛИ: BAGG_TEMP_08)

Баггинг (bootstrap aggregating) [9] – метод ансамблевого обучения, при котором тренировочные данные несколько раз случайным образом разделяются и на каждом наборе данных обучается модель ИИ. Для одного наблюдения формируются прогнозы нескольких моделей, которые объединяются путем усреднения. За счет разного набора данных снижается зависимость от случайного разделения данных на тренировочный и тестовый наборы данных. Схема баггинга приведена на рисунке 1.

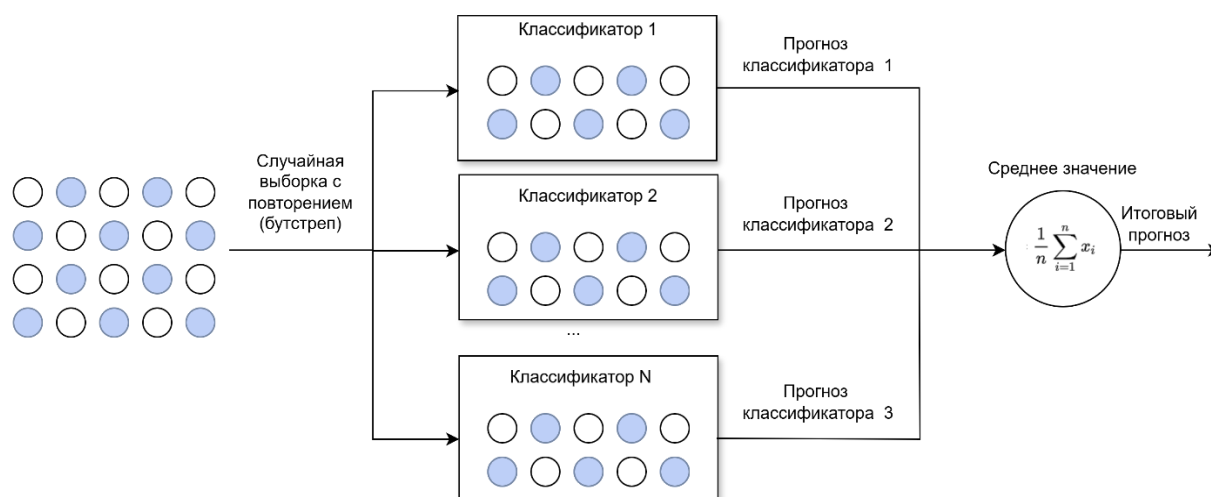


Рис. 1. Схема баггинга

Fig. 1. Bagging scheme

При обучении модели были установлены гиперпараметры, аналогичные базовой модели. Для того чтобы организовать баггинг, дополнительно мы добавили значение параметра «bagging_temperature» [10] = 0.8. По умолчанию этот параметр установлен равным 1.0⁴. Значения параметра «bagging_temperature» изменяются в диапазонах:

- «bagging_temperature» = 0: отменяет баггинг. При этом каждая отдельная модель будет обучаться на всем наборе данных;
- «bagging_temperature» > 0: включает баггинг. Увеличение этого параметра приводит к большей случайности при формировании подвыборок, что может помочь снизить переобучение модели, но также может увеличить вероятность недообучения.

МОДЕЛЬ СОЗДАНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ ДЛЯ САМЫХ БОЛЬШИХ ПО ВКЛАДУ SHAPLEY VALUES (КОД МОДЕЛИ: SHAP_COL_INTERACTION)

Shapley values – метод из теории кооперативных игр, который позволяет «честно» определить вклад значения каждой переменной в итоговый прогноз модели ИИ. Данный метод объяснимого искусственного интеллекта был разработан в 1951 году [11] и получил широкое распространение благодаря современной реализации на библиотеке SHAP [12].

Основная гипотеза данного эксперимента: создание новых признаков, основанное на поэлементных операциях над наиболее значимыми исходными переменными, иногда улучшает показатели качества моделей ИИ за счет обогащения признакового пространства, выявления/усиления скрытых взаимосвязей. Использование комбинаций только с переменными с наибольшим вкладом по Shapley values позволяет создавать новые, более релевантные переменные без перебора всех переменных, входящих в модель ИИ, что снижает уровень дополнительного шума.

В данном эксперименте формируется список переменных с наибольшим вкладом Shapley values в прогноз (на валидационных данных) только из числовых переменных с суммарным вкладом в больше 70 % от общего вклада Shapley values в прогноз всех

⁴Необходимо добавить, что параметр «bagging_temperature» может быть использован только при установке в параметре «bootstrap_type» значения, равного «Bayesian». В ходе экспериментов данный параметр не устанавливался дополнительно, но для задач бинарной классификации параметр «bootstrap_type» по умолчанию установлен равным «Bayesian».

числовых переменных. Для определения Shapley values обучаем временную базовую модель с параметрами, аналогичными базовой модели, с помощью встроенного в библиотеку SHAP метода TreeExplainer преобразуем валидационные данные в Shapley values. Далее на основе этого списка переменных с наибольшим вкладом Shapley values был сформирован список комбинаций переменных длиной 2, то есть получились комбинации ((«Столбец1», «Столбец2»), («Столбец1», «Столбец3»), ...). Для расчета новых полей по списку комбинаций переменных использовались методы поэлементных арифметических операций (сложение, вычитание, умножение, деление, остаток от деления). Данный подход включает следующие шаги:

- Разделение данных на данные для обучения (train), настройки (val), тестирования (test).
- Обучение модели CatboostClassifier с параметрами базовой модели на данных для обучения (train).
- Передача обученной модели CatboostClassifier алгоритму SHAP. Обучение алгоритма shap.TreeExplainer(CatboostClassifier).
- Преобразование данных для настройки (val) в Shapley values.
- Расчет суммарных вкладов каждой переменной в итоговый прогноз на данных для настройки (val).
- Сортировка суммарных вкладов переменных в итоговый прогноз от большего к меньшему.
- Отбор переменных с наибольшим вкладом так, чтобы вклад отобранных переменных в итоговый прогноз был больше 70 % от вклада всех переменных.
- Формирование списка комбинаций отобранных переменных длиной 2 (только числовые столбцы) ((«Столбец1», «Столбец2»), («Столбец1», «Столбец3»), ...).
- Формирование новых переменных: применение поэлементных арифметических операций (сложение, вычитание, умножение, деление, остаток от деления) для каждого элемента списка комбинаций отобранных переменных длиной 2 («Столбец1», «Столбец2») : (сложение, вычитание, ...).
- Обучение модели CatboostClassifier с параметрами базовой модели на наборе данных для обучения (train) с включенными новыми переменными.
- Замер показателей качества классификации на данных для тестирования (test).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В таблице 4 приведены рассчитанные на тестовых данных средние метрики оценки эффективности моделей классификации для базовой модели.

Таблица 4. Результаты экспериментов

Table 4. Experiment results

Код эксперимента	Средняя точность (Average precision)	Сбалансированная точность (Balanced accuracy)	Оценка Брайера (Brier score)	F1-score	ROC AUC
base	0,57090	0,64304	0,10078	0,42777	0,85807
bagg_temp_08	0,57090	0,64304	0,10078	0,42777	0,85807
SHAP_col_interaction	0,49836	0,65012	0,10414	0,44715	0,84425

Все дополнительные эксперименты не дали улучшения показателей качества классификации. На рисунке 2 приведены ROC-AUC кривые моделей ИИ.

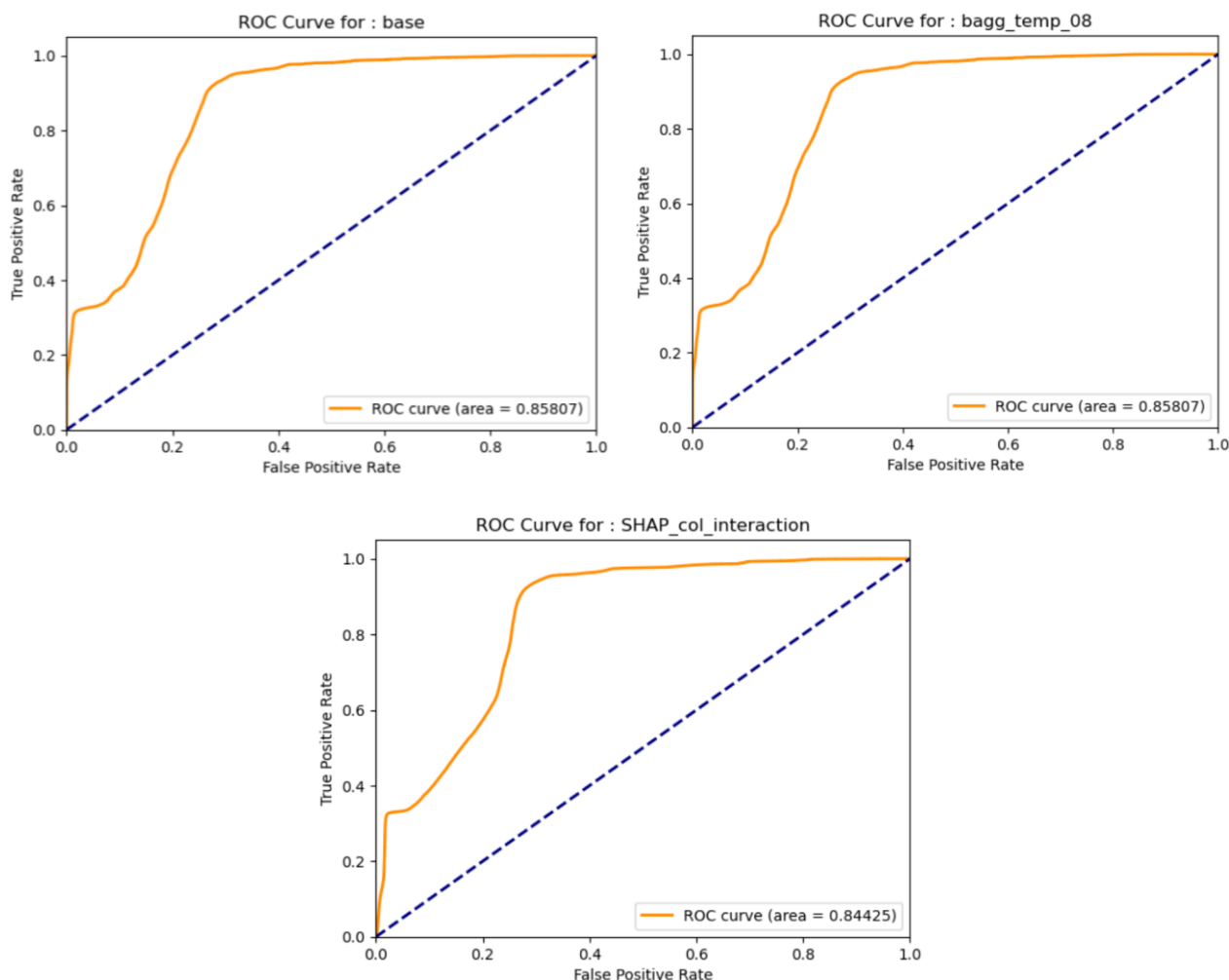


Рис. 2. ROC-AUC кривые моделей ИИ

Fig. 2. ROC-AUC curves of AI models

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

БАЗОВАЯ МОДЕЛЬ

Высокое значение показателя ROC_AUC говорит о хорошей ранжирующей способности модели. В то же время значения метрик, среднее гармоническое значение между точностью и полнотой F1-score и средняя точность довольно низкие. Значение оценки Брайера [13] = 0,10078, отличное от нуля, указывает на то, что модель не очень хорошо откалибрована, то есть прогнозные вероятности модели ИИ отличаются от фактических вероятностей.

Отличие параметров ROC_AUC от F1-score связано с их природой. Параметр ROC_AUC определяет ранжирующую способность модели ИИ и не учитывает долю наблюдений положительного класса в предсказанном положительном классе⁵. Параметр F1-score, рассчи-

⁵Краткая методика построения ROC_AUC: наблюдения ранжируются по прогнозной вероятности положительного класса (мошеннической транзакции) от большего к меньшему. Ось Y – True Positive Rate, Ось X – False Positive Rate. В начало координат ставится точка, и в цикле по ранжированным переменным от большей прогнозной вероятности положительного класса к меньшей: если значение истинно положительное (мошенническая транзакция), то отрезок кривой ROC_AUC делает шаг горизонтально вверх, в противном случае вертикально вправо.

танный как среднегармоническое между точностью и полнотой, учитывает долю правильно классифицированных наблюдений и сильно зависит от порога отнесения к положительному классу (установлен 0,5 по умолчанию). Исходя из этого для увеличения показателя качества F1-score необходимо пересмотреть точку отнесения к положительному классу классификации.

Для дальнейшего улучшения показателей качества модели необходимо провести модификацию настройки базовой модели:

- провести мероприятия по корректировке дисбаланса классов, например, применить метод OverSampling;
- провести настройку гиперпараметров с помощью байесовских методов, например, с помощью одного из лучших отраслевых решений по настройке гиперпараметров – алгоритма Optuna [14].

МОДЕЛЬ БАГГИНГА

По данной модели мы не получили статистически значимого прироста показателей качества. В базовой модели использовался Catboost с установленным по умолчанию параметром «bagging_temperature», который равняется 1.0, что соответствует применению технологии баггинга. В ходе эксперимента мы снизили «bagging_temperature» с установленного по умолчанию значения, равного 1, до 0.8, однако не провели сравнение с показателями качества без баггинга («bagging_temperature» = 0). Из-за того, что разница между 1.0 и 0.8 незначительная, получили статистически не значимое различие между базовой моделью и экспериментом.

При практическом применении на реальных задачах метод баггинга дает прирост показателей качества, поэтому в последующих экспериментах мы продолжим исследования, как лучше его настроить, чтобы получить улучшение показателей качества. В дальнейшем мы предполагаем применить другой метод обучения модели баггинга: используем прямое разделение данных дополнительным методом кросс-валидации kFold, обучим N (N изменяется от 1 до 100) моделей Catboost и усредним их прогнозы. При этом параметр «bagging_temperature» оставим установленным по умолчанию и равным 1.

МОДЕЛЬ СОЗДАНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ (КОД МОДЕЛИ: SHAP_COL_INTERACTION)

Для этой модели мы также не получили статистически значимого прироста показателей качества. Видимо, создание и включение столбцов с Shapley values не дает дополнительной информации, так как Shapley values сформированы статистическими методами из тех же данных, что и сами данные, используемые моделью ИИ для обучения. Shapley values хорошо использовать как инструмент объяснимого искусственного интеллекта, однако он не дает прироста качества классификации на финансовых данных. В последующих исследованиях мы рассмотрим гибридные подходы с объединением систем экспертных правил и моделей ИИ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования проведено построение модели ИИ на транзакционных данных банка. Рассмотрены особенности кодирования категориальных переменных при наличии в данных временных меток. Проведен анализ рассчитанных на тестовых данных показателей качества модели. Из всей совокупности показателей только метрика ROC_AUC имеет высокое значение, так как не зависит от выбора точки отнесения к положительному классу

классификации. Эксперименты по использованию баггинга и созданию новых переменных на основе вклада *Shapley values* в прогноз не дали статистически значимых результатов, в то же время анализ результатов привел к необходимости проведения дальнейших исследований. В последующем будет проведена корректировка метода баггинга с использованием прямого разделения данных дополнительным методом кросс-валидации *kFold* и обучением *N* моделей *Catboost* с усреднением их прогноза. Также представляет интерес рассмотрение гибридных подходов с объединением систем экспертных правил и моделей ИИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Mashrur A., Luo W., Zaidi N.A., Robles-Kelly A. Machine Learning for Financial Risk Management: A Survey. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. Pp. 203203–203223. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3036322
2. Awosika T., Shukla R.M., Pranggono B. Transparency and Privacy: The Role of Explainable AI and Federated Learning in Financial Fraud Detection. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. Pp. 64551–64560. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3394528
3. McMahan B., Moore E., Ramage D. et al. Communication-efficient learning of deep networks from decentralized data. *Proceedings of the 20th International Conference on Artificial Intelligence and Statistics*. 2017. Vol. 54. Pp. 1273–1282. DOI: 10.48550/arXiv.1602.05629
4. Ali A.A., Khedr A.M., El-Bannany M., Kanakkayil S. A Powerful Predicting Model for Financial Statement Fraud Based on Optimized XGBoost Ensemble Learning Technique. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. No. 4. P. 2272. DOI: 10.3390/app13042272
5. He K., Yang Q., Ji L. et al. Financial Time Series Forecasting with the Deep Learning Ensemble Model. *Mathematics*. 2023. Vol. 11. No. 4. P. 1054. DOI: 10.3390/math11041054
6. Prokhorenkova L., Gusev G., Vorobev A. et al. CatBoost: unbiased boosting with categorical features. *NIPS'18: Proceedings of the 32nd International Conference on Neural Information Processing Systems*. 2018. Pp. 6639–6649. DOI: 10.48550/arXiv.1706.09516
7. Micci-Barreca D. A Preprocessing Scheme for High-Cardinality Categorical Attributes in Classification and Prediction Problems. *ACM SIGKDD Explorations Newsletter*. Vol. 3. No. 1. Pp. 27–32. DOI: 10.1145/507533.507538
8. Dorogush A.V., Ershov V., Gulin A. CatBoost: gradient boosting with categorical features support. *Workshop on ML Systems at NIPS*. 2017. DOI: 10.48550/arXiv.1810.11363
9. Breiman L. Bagging predictors. *Machine Learning*. 1996. Vol. 24. No. 2. Pp. 123–140. DOI: 10.1007/BF00058655
10. Official website Catboost. Common parameters. Точка доступа: https://catboost.ai/en/docs/references/training-parameters/common#bagging_temperature (дата обращения: 10 января 2025)
11. Shapley L. Notes on the *n*-person game, ii: the value of an *n*-person game. 1951.
12. Official website SHAP library. Точка доступа: https://shap.readthedocs.io/en/latest/example_notebooks/tabular_examples/tree_based_models/Catboost%20tutorial.html (дата обращения: 10 января 2025)
13. Brier Glenn W. Verification of forecasts expressed in terms of probability. *Monthly Weather Review*. 1950. Vol. 78. No. 1. Pp. 1–3. Bibcode:1950MWRv...78....1B. DOI: 10.1175/1520-0493(1950)078<0001:VOFEIT>2.0.CO
14. Akiba T., Sano S., Yanase T. et al. Optuna: A Next-generation Hyperparameter Optimization Framework. *KDD '19: Proceedings of the 25th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*. Pp. 2623–2631. DOI: 10.1145/3292500.3330701

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Информация об авторах

Константинов Алексей Федорович, аспирант кафедры информатики, Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова;

115054, Россия, Москва, Стремянный переулок, 36;

konstantinovaf@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9591-3301>, SPIN-код: 3088-3121

Дьяконова Людмила Павловна, канд. физ.-мат. наук, доцент, кафедра информатики, Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова;

115054, Россия, Москва, Стремянный переулок, 36;

Dyakonova.LP@rea.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5229-8070>, SPIN-код: 2513-8831

Information about the authors

Alexey F. Konstantinov, Post-graduate Student, Department of Informatics, Plekhanov Russian University of Economics;

115054, Russia, Moscow, 36 Stremyanny lane;

konstantinovaf@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9591-3301>, SPIN-code: 3088-3121

Lyudmila P. Dyakonova, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Department of Informatics, Plekhanov Russian University of Economics;

115054, Russia, Moscow, 36 Stremyanny lane;

Dyakonova.LP@rea.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5229-8070>, SPIN-code: 2513-8831

Интеллектуальная рекомендательная система для защиты яблоневых садов в КБР

А. З. Темроков¹, К. Ч. Бжихатлов^{✉2}

¹Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х. М. Бербекова
360004, Россия, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173

²Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук
360010, Россия, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2

Аннотация. Одним из важных направлений сельского хозяйства является плодородное садоводство, в частности, интенсивные яблоневые сады вносят заметный вклад в сельскохозяйственную отрасль Кабардино-Балкарской Республики. При этом для сохранения урожая необходимо обеспечить своевременное выявление и устранение угроз, связанных с болезнями и вредителями яблок. Учитывая нехватку профильных специалистов, актуальной становится задача разработки автоматизированной системы распознавания болезней и вредителей яблоневых садов. Для этого в рамках исследования была поставлена цель – разработка и оценка применимости интеллектуальной рекомендательной системы для защиты яблоневых садов в КБР. В данной статье описана концепция и приведены результаты разработки системы контроля состояния яблоневых садов, предназначенной для выявления болезней и вредителей на деревьях, а также подбора наиболее подходящего плана защиты растений в зависимости от местоположения сада. Программа представляет собой веб-приложение, созданное на основе фреймворков FastAPI, Vue.js и нейронной сети, отвечающих за распознавание вредителей и болезней яблонь по фотографии и составление оптимального плана их обработки. Приведены результаты обучения нейронной сети на подготовленной выборке фотографий здоровых и зараженных яблок. В качестве основы для нейронной сети использовались различные модели: Roboflow 3.0, RF-DETR, YOLO v11 и YOLO v12. Разработанный сервис позволит диагностировать заболевания яблонь с минимальными задержками по времени, а также обеспечить подбор методов защиты в случае необходимости, что снизит риски потери урожая садоводами. В результате тестирования наилучших показателей достигла модель Roboflow 3.0: mAP составила 91,0 %, precision – 97,5 %, а recall – 88,5 %, что свидетельствует о применимости подхода, но этого недостаточно для внедрения. С целью повышения точности и расширения списка распознаваемых угроз планируется сбор дополнительных фотоматериалов в садах республики, в том числе фотографий листьев и стволов яблоневых деревьев, полученных в различных погодных условиях, и дальнейшее тестирование с участием садоводов республики.

Ключевые слова: распознавание образов, яблоня, заболевания яблок, рекомендательная система, машинное обучение, интернет-сервис

Поступила 10.03.2025, одобрена после рецензирования 07.04.2025, принята к публикации 09.04.2025

Для цитирования. Темроков А. З., Бжихатлов К. Ч. Интеллектуальная рекомендательная система для защиты яблоневых садов в КБР // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2025. Т. 27. № 2. С. 23–36. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-2-23-36

Intelligent recommendation system for apple orchard protection in the Kabardino-Balkarian Republic

A.Z. Temrokov¹, K.Ch. Bzhikhatlov^{✉2}

¹Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov
360004, Russia, Nalchik, 173 Chernyshevsky street

²Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
360010, Russia, Nalchik, 2 Balkarov street

Abstract. One of the important areas of agriculture is fruit gardening, in particular, intensive apple orchards make a significant contribution to the agricultural sector of the Kabardino-Balkarian Republic. At the same time, to preserve the harvest, it is necessary to ensure timely detection and elimination of threats associated with apple diseases and pests. Given the shortage of specialized specialists, the task of developing an automated system for recognizing diseases and pests of apple orchards becomes urgent. For this purpose, the study set the goal of developing and assessing the applicability of an intelligent recommendation system for the protection of apple orchards in the KBR. This article describes the concept and presents the results of the development of a system for monitoring the condition of apple orchards, designed to identify diseases and pests on trees, as well as select the most appropriate plant protection plan depending on the location of the orchard. The program is a web application created on the basis of the FastAPI, Vue.js frameworks and a neural network, responsible for recognizing pests and diseases of apple trees from a photograph and drawing up an optimal plan for their treatment. The results of training a neural network on a prepared sample of photographs of healthy and infected apples are presented. Various models were used as a basis for the neural network: Roboflow 3.0, RF-DETR, YOLO v11 and YOLO v12. The developed service will allow diagnosing apple tree diseases with minimal time delays, as well as ensuring the selection of protection methods, if necessary, which will reduce the risks of crop loss by gardeners. As a result of testing the model, the Roboflow 3.0 model achieved the best indicators: mAP was 91.0%, precision 97.5%, and recall 88.5%, which indicates the applicability of the approach. In order to expand the list of recognizable threats and improve accuracy, it is planned to collect additional photographic materials in the republic's orchards, including photographs of leaves and trunks of apple trees, and further testing with the participation of gardeners of the republic.

Keywords: image recognition, apple tree, apple diseases, recommendation system, machine learning, internet service

Submitted 10.03.2025,

approved after reviewing 07.04.2025,

accepted for publication 09.04.2025

For citation. Temrokov A.Z., Bzhikhatlov K.Ch. Intelligent recommendation system for apple orchard protection in the Kabardino-Balkarian Republic. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2025. Vol. 27. No. 2. Pp. 23–36. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-2-23-36

ВВЕДЕНИЕ

В современном сельском хозяйстве одной из основных проблем является обеспечение защиты посевов от болезней и вредителей, в частности, эти факторы негативно сказываются как на объеме собираемого урожая в плодовых садах, так и на его качестве. При этом стоит отметить тренд на отток трудовых ресурсов в сельском хозяйстве [1], в результате чего сейчас наблюдается дефицит кадров в области защиты растений. Одним из способов решения перечисленных выше проблем выступает использование интеллектуальных систем в сельском хозяйстве [2, 3]. Учитывая значительную роль яблоневых садов в экономике Кабардино-Балкарской Республики [4], задача автоматизации агротехнических процессов, в частности своевременного определения вредителей и болезней, является

особенно актуальной. Среди основных болезней яблонь можно выделить паршу (*Venturia inaequalis*), мучнистую росу (*Podosphaera leucotricha*), монолиз (*Monilia fructigena*) и последствия бактериального ожога (*Erwinia amylovora*) [5, 6]. Стоит также отметить наличие проблем с рядом вредителей яблони [7, 8]: яблонная моль (*Hyponomeuta malinella*), кровавая тля (*Eriosoma lanigerum*), паутинный клещ (*Tetranychus urticae*) и яблонная плодожорка (*Cydia pomonella*). Внешние признаки основных болезней и вредителей яблонь, распространенных на территории КБР, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Внешние признаки болезней и вредителей яблонь

Table 1. External signs of apple tree diseases and pests

Тип	Наименование болезни или вредителя	Внешние признаки
Болезни	Парша	Характеризуется появлением темных пятен на листьях, плодах и побегах
	Мучнистая роса	Характеризуется появлением белого порошка на плодах и листьях яблонь, вследствие чего листья могут закручиваться и осыпаться
	Монилиоз или плодовая гниль	Вызывает покраснение и усыхание листьев и гниение плодов
	Бактериальный ожог	Вызывает пожелтение и появление бурой или черной окраски на побегах и листьях
Вредители	Яблонная моль или листовертка	После вылупления личинки покрываются паутиной и начинают питаться листьями дерева, сворачивая их и создавая характерные узлы
	Кровавая тля	Вызывает увядание и покрытие липкой росой листьев яблони
	Паутинный клещ	Паутинные клещи покрывают нижнюю сторону листьев и плодов тонкими «паутинными» нитями
	Яблонная плодожорка или яблоневого червь	Гниение плодов яблони

Существует ряд исследований, посвященных автоматизации процесса обнаружения болезней на яблонях. В работе [9] представлен обзор сверточных нейронных сетей в задачах обнаружения заболеваний растений на примере архитектур CNN, ResNet, DenseNet, MobileNet и EfficientNet. Все рассмотренные архитектуры показали достаточно высокий уровень точности распознавания (не менее 95 %). А в статье [10] приведены результаты анализа нейронных моделей классификации MLP (MultiLayer Perceptrons), RBF (Radial Basis Function) и DNN (Deep Neural Networks) для обнаружения болезней на изображениях яблонь. В работах [11, 12, 13, 14] рассматривались различные архитектуры нейронных сетей для распознавания болезней на изображениях листьев яблони (модели VGG16, ResNet50, SDINet). Результаты позволили распознавать различные заболевания по фото листьев с точностью 95 % и выше. А в [15] для распознавания степени поражения листьев грибом *Alternaria* использовалась интеграция двух нейронных сетей PSPNet (на базе модели MobileNet) и UNet (на базе VGG), что позволило добиться средней точности 96 %. В [16] для этой же задачи используется сеть с архитектурой Yolo, а в [17] описаны методы оптимизации гиперпараметров для данной модели нейронной сети.

Во всех представленных работах исследователи показали применимость нейронных сетей в задаче распознавания вредителей и болезней. Стоит отметить, что уже существует ряд промышленных решений, применимых для автоматизации защиты растений [18]. При этом, учитывая значительное влияние климатических условий и ландшафта на процесс роста и развития деревьев и протекание их заболеваний, наиболее эффективные решения должны строиться на использовании наборов данных для конкретного региона. В данной работе описана разработка сервиса распознавания болезней и подготовки рекомендаций на основе данных по болезням яблонь в Кабардино-Балкарской Республике.

АРХИТЕКТУРА ПРИЛОЖЕНИЯ

С целью обеспечения возможности быстрого определения болезни яблони и подбора рекомендаций по защите разрабатывается сервис контроля состояния яблоневых садов. Для удобства пользователя сервис реализован в виде веб-сайта, а также в виде бота для мессенджера «Telegram». Соответственно, пользователь может подключиться к сервису либо через веб-браузер, либо из приложения мессенджера. В обоих случаях на сервер передается фотография яблока, которая передается в нейронную сеть, обученную распознавать болезни яблок. Далее результат ее работы передается в нейронную сеть, подбирающую рекомендации. Стоит отметить, что на сервере также есть база данных, хранящая все предыдущие запросы и рекомендации к ним, сгруппированные по садам пользователя. Архитектура разработанного сервиса приведена на рисунке 1 (сиреневые линии – передача изображения, оранжевые – передача промежуточных данных, зеленые – ответ пользователю с рекомендациями).

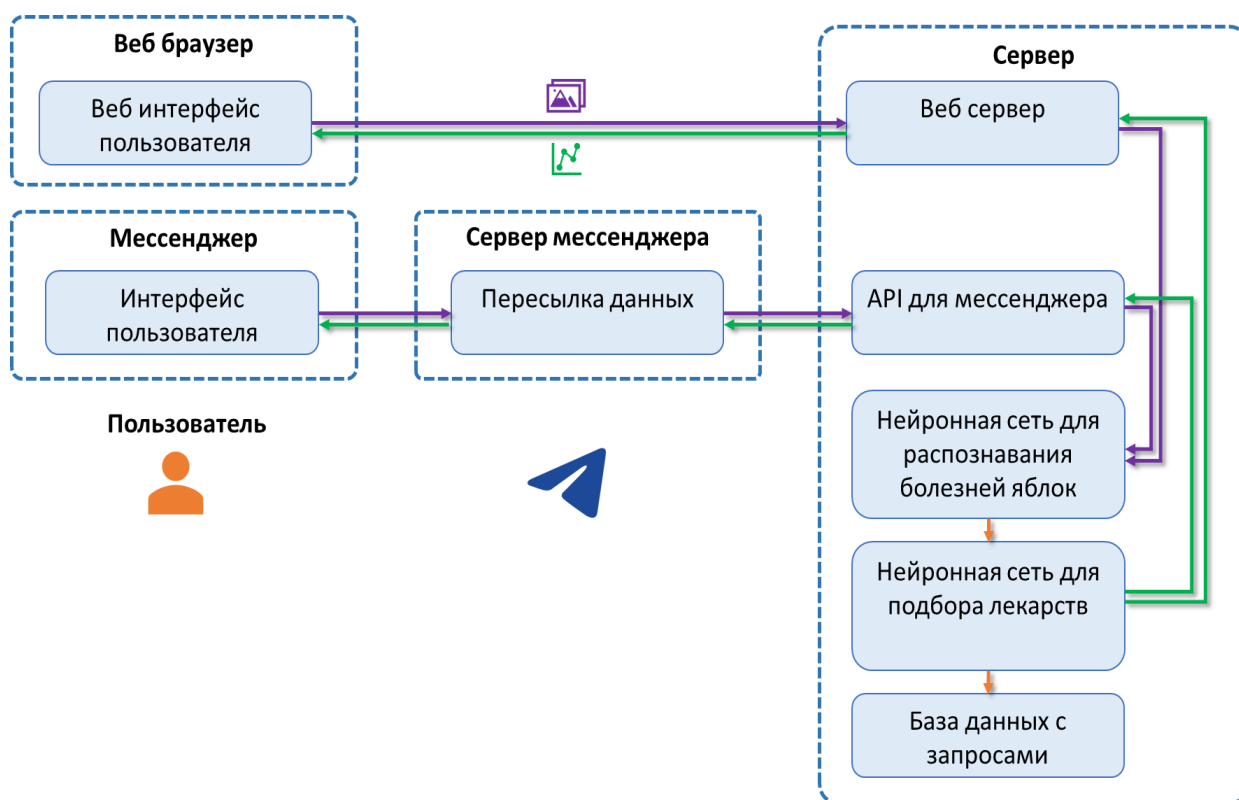


Рис. 1. Архитектура сервиса контроля состояния яблоневых садов

Fig. 1. Architecture of the apple orchard condition monitoring service

Разработанный веб-сервис представляет собой программу, написанную на языке программирования python с использованием FastAPI¹, который представляет собой высокоуровневый веб-фреймворк, что упрощает создание безопасных и масштабируемых веб-приложений. Клиентская часть сервиса использует Vue.js² – JavaScript-фреймворк для создания пользовательских интерфейсов. Отчет об обработке изображения формируется в формате PDF с использованием библиотеки PyPDF³. Внешний вид главной страницы приведен на рисунке 2. На нем доступны ссылки на личный кабинет пользователя и список садов, в основной части располагается приглашение к загрузке изображения. После загрузки изображения сервис сразу выводит результаты – описание болезни (при ее наличии) и рекомендации по защите. Эти данные можно выгрузить в виде pdf-файла. Для зарегистрированных пользователей доступно объединение набора изображений в сад, где ведется учет всех рекомендаций, полученных пользователем (рис. 3). Структура разработанного сайта и базы данных подробнее описаны в [19].

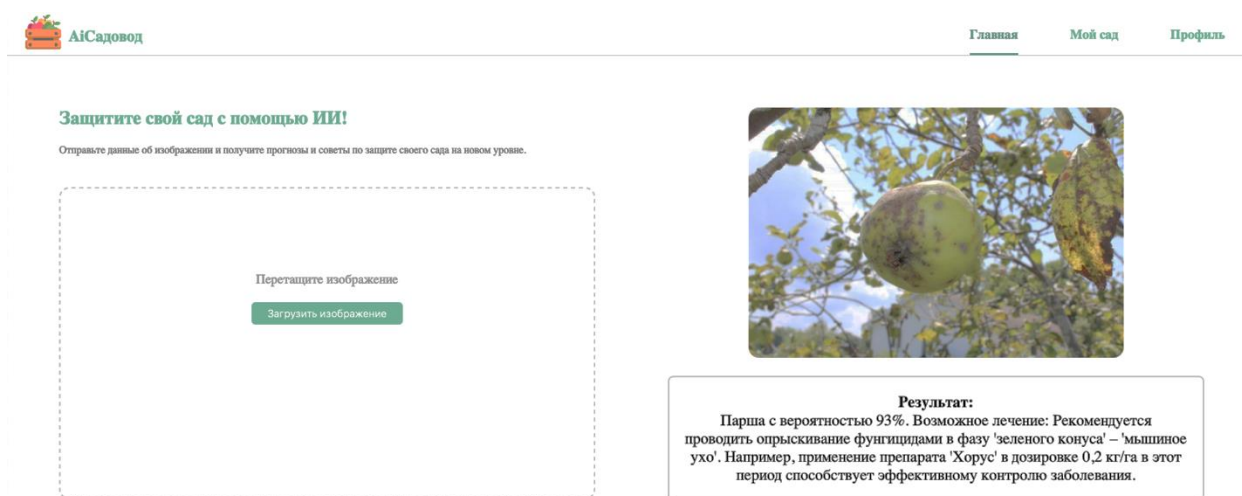


Рис. 2. Пользовательский интерфейс веб-приложения

Fig. 2. User interface of the web application

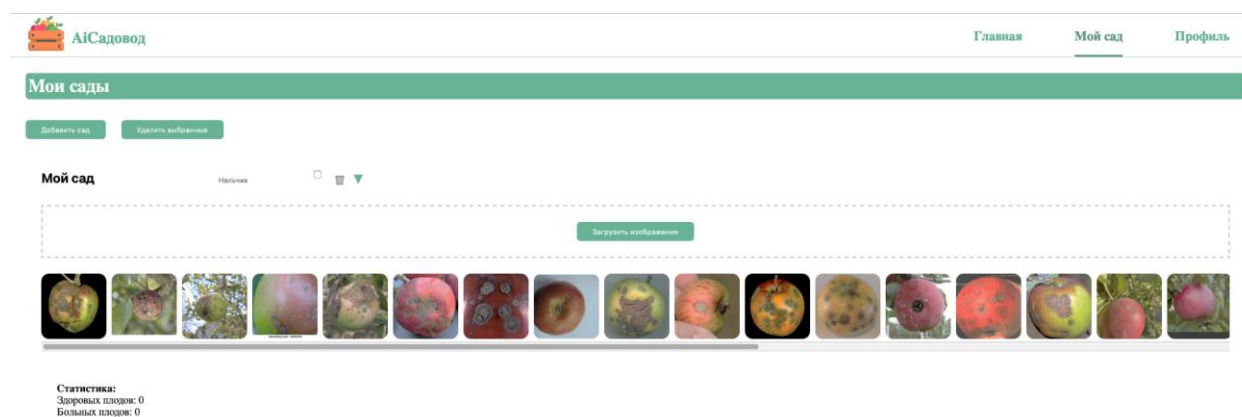


Рис. 3. Интерфейс сада пользователя

Fig. 3. User's garden interface

¹FastAPI documentation. URL: <https://fastapi.tiangolo.com>

²Vue.js documentation. URL: <https://vuejs.org>

³PyPDF documentation. URL: <https://pypdf.readthedocs.io>

В случае работы с мессенджером пользователь должен подключиться к нему и просто отправить изображение, в ответ придет рекомендация (рис. 4). Работа с мессенджером реализована с помощью библиотеки Aiogram⁴.

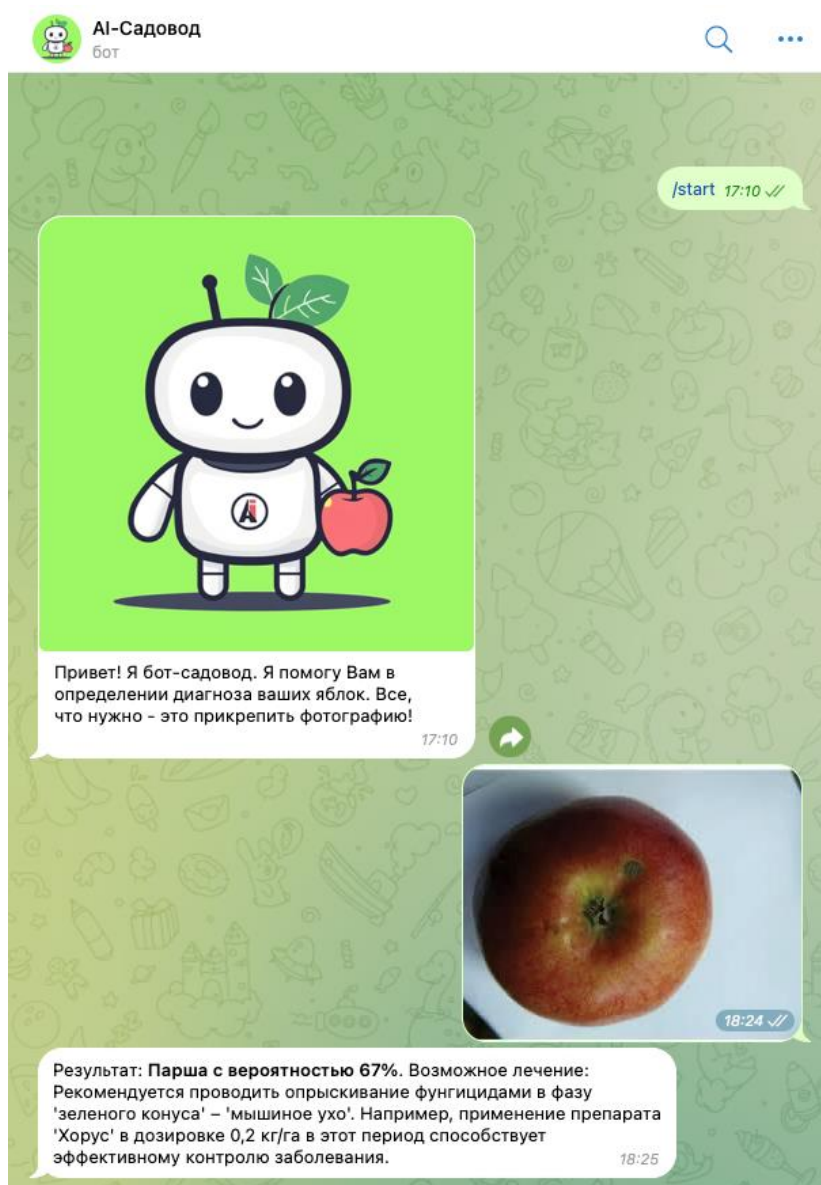


Рис. 4. Работа чат-бота в мессенджере «Telegram»

Fig. 4. Chatbot operation in the Telegram messenger

Подобное решение позволяет максимально упростить взаимодействие пользователя с сервисом. На данном этапе ведется работа по созданию чат-бота для других мессенджеров.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Для обеспечения распознавания яблок рассматриваются различные архитектуры нейронных сетей, в частности, в работе использовался сервис Roboflow и доступные в нем модели нейронных сетей для распознавания изображений: Roboflow 3.0 (Fast), RF-DETR

⁴Aiogram documentation. URL: <https://docs.aiogram.dev>

(base), YOLO v11 и YOLO v12. Для обучения модели было собрано 1500 изображений яблок, деревьев и листьев, полученных за счет фотографий в садах республики и сбора данных из открытых источников. Все изображения были размечены и разделены на 8 классов: здоровые яблоки «healthy» (268 изображений), яблоки с признаками парши «scab» (285), гнилые «rot» (376), пораженные грибковыми заболеваниями «blotch» (252), признаки наличия тли «aphids» (433), цветоеда «flower eater» (122), яблоневой моли «apple moth» (71) и плодовой жоржки «fruit moth» (64). Стоит отметить, что в выборке были яблоки, имеющие признаки двух или трех заболеваний сразу, поэтому количество меток (1871) несколько больше количества изображений. Входной набор изображений имел значительный разброс в размерах и разную ориентацию. Для дальнейшего обучения все изображения автоматически ориентированы в альбомную ориентацию и приведены к размеру 640*640 пикселей. Для увеличения обучающей выборки использовались методы аугментации: поворот изображения на 90 градусов, сдвиг по горизонтали и вертикали и добавление шума, в результате чего количество изображений было увеличено до 3400. Стоит отметить, что полученный набор данных имеет некоторый дисбаланс в классах (явно не хватает изображений с признаками flower eater, apple moth и fruit moth), что может стать причиной низких значений точности распознавания. Пример изображения, используемого для обучения модели, показан на рисунке 5.



Рис. 5. Пример размеченного изображения из набора собранных данных

Fig. 5. Example of a labeled image from the collected dataset

Разметка данных, обучение моделей и их дальнейшее развертывание проводились на сервисе RoboFlow. Для каждой обученной модели определены основные метрики: mean Average Precision или mAP (усредненная точность по всем классам), precision (точность) и recall (полнота). Результаты обучения и тестирования для четырех созданных моделей приведены в таблице 2.

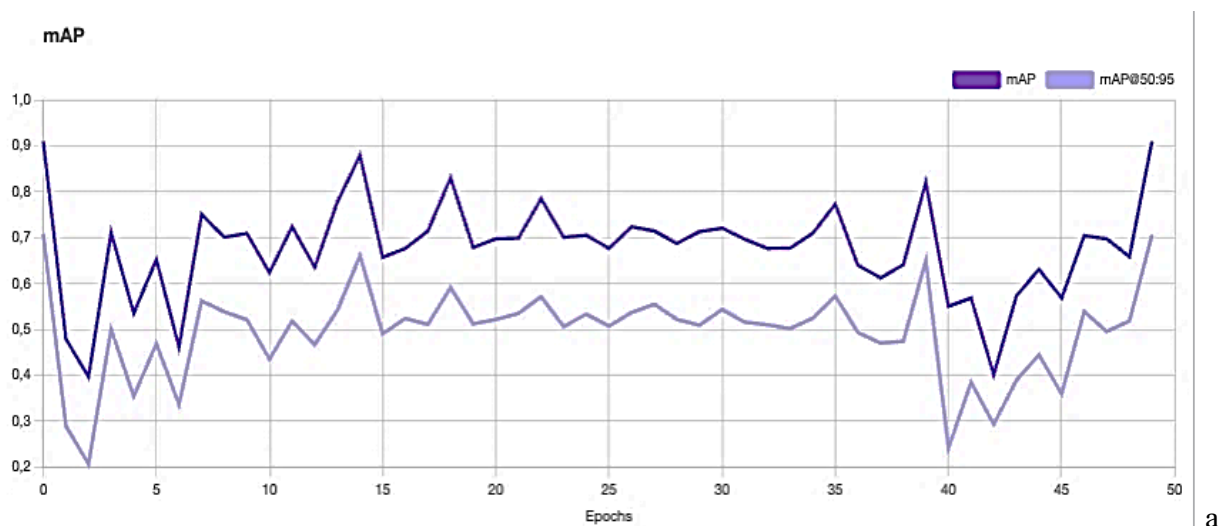
Таблица 2. Результаты обучения и тестирования моделей для распознавания болезней и вредителей на яблоках

Table 2. Results of training and testing models for recognizing diseases and pests on apples

Модель	Архитектура	Метрики		
		mAP, %	precision, %	recall, %
apple disease and pest detection ⁵	Roboflow 3.0	91,0	97,5	88,5
test detection yolov12 ⁶	Yolo v12	82,8	82,7	75,9
test detection yolov11 ⁷	Yolo v11	86,1	86,3	81,0
rf detection ⁸	RF-DETR	82,4	100	100

Полученные модели позволили определять заболевания и вредителей яблок, причем для моделей на базе архитектуры Yolo метрики достигли достаточно высоких показателей. Лучше всего в задаче распознавания болезней и вредителей яблок себя показала модель «test detection yolov12» на основе Roboflow 3 версии: mAP составила 91,0 %, precision – 97,5 %, а recall – 88,5 %. Подобные показатели позволяют говорить о положительном результате, но для внедрения такого сервиса требования значительно выше. Повышение точности возможно за счет сбора значительного объема фотоматериала в садах республики, причем полученных с различных ракурсов и в различных погодных условиях.

На рисунке 6 приведена зависимость метрики mAP от эпохи обучения каждой модели. Как видно из рисунка, для большинства моделей усредненная точность значительно колеблется, что, вероятно, свидетельствует о малом объеме обучающей выборки. Наиболее стабильный процесс обучения модели наблюдается для Yolo v12 (рисунок 6 б).



⁵Apple Disease & Pest Detection. URL: https://universe.roboflow.com/aydemir/apple_disease_-_pest_detection

⁶Test detection YOLOVv12. URL: https://universe.roboflow.com/aydemir/test_detection_yolov12

⁷Test detection YOLOVv11. URL: https://universe.roboflow.com/aydemir/test_detection_yolov11

⁸RF Detection. URL: https://universe.roboflow.com/aydemir/rf_detection

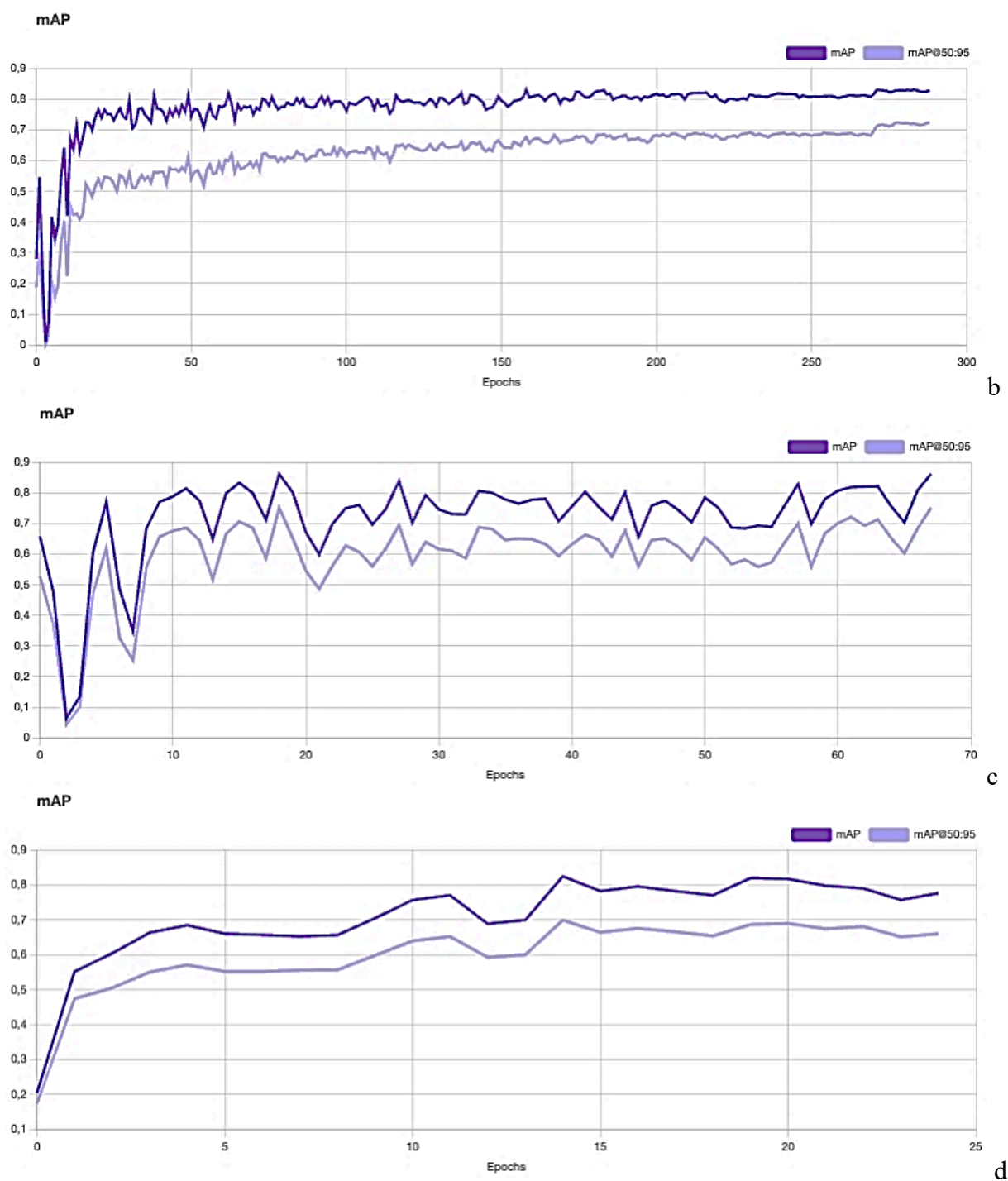


Рис. 6. Зависимость метрики *mAP* от эпохи обучения нейронной сети для моделей на базе Roboflow 3.0 (a), Yolo v12 (b), Yolo v11 (c) и RF-DETR (d)

Fig. 6. Dependence of the *mAP* metric on the neural network training epoch for models based on Roboflow 3.0 (a), Yolo v12 (b), Yolo v11 (c) and RF-DETR (d)

Результаты распознавания заболеваний и вредителей отправляются в другую нейронную сеть, которая подбирает методы защиты деревьев. Подбор рекомендаций основан на использовании библиотеки CatBoost classifier⁹, для дообучения которого необходим набор

⁹CatBoost documentation. URL: <https://catboost.ai/>

данных с указанием распознанного заболевания, расположения, погодных условий и даты фиксации заболевания, а в качестве выходных данных – наиболее эффективные меры защиты сада. Для сбора подобного массива данных необходимо обеспечить автоматическое распознавание болезней и вредителей яблок с помощью данной системы в течение нескольких сезонов. На данный момент в выборке существует лишь набор основных рекомендаций специалистов по болезням и вредителям яблок.

Для дальнейшего увеличения точности работы модели планируется расширение выборки за счет использования изображений, находящихся в широком доступе, а также изображений, собранных самостоятельно и отражающих заболевания и вредителей, характерных для Кабардино-Балкарской Республики. Кроме того, предполагается использование не только данных из изображения, но и информации об условиях в саду (широта, долгота, время года, температура, влажность, инсоляция, сумма активных температур и т.д.).

Как отмечалось выше, сейчас нейронная сеть для обработки изображений развернута на внешнем сервисе. Сейчас сервер отвечает за получение запросов от пользователей, их хранение и передачу изображений на внешнюю нейронную сеть, а также генерацию ответов пользователю. В такой реализации требования к серверу минимальные – скрипт занимает всего 135 Мб оперативной памяти. В процессе тестирования среднее время обработки одного изображения (при отправке с мобильного телефона со средней скоростью загрузки 50 Мбит/с и отправки 25 Мбит/с) составило 4,1 секунды. Дальнейшее развитие сервиса предполагает развертывание нейросети на собственном сервере и независимую работу в онлайн-режиме. В этом случае сервер должен отвечать следующим требованиям: CPU 4-ядерный процессор (Intel Core i5, AMD Ryzen 5 или выше), GPU с поддержкой технологии CUDA и 6 ГБ видеопамяти (NVIDIA GTX 1060 или выше), RAM 16 ГБ, SSD 256 ГБ. Пользователь должен обладать устойчивым интернет-соединением (минимум 10 Мбит/с). Локальное развертывание сервиса связано с рядом трудностей и, по нашему мнению, не является критичным, поскольку большая часть садов республики расположена в регионах со стабильной сотовой связью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный сервис позволит диагностировать заболевания яблонь с минимальными задержками по времени, а также обеспечить подбор методов защиты в случае необходимости. Это должно позволить снизить риски потери урожая садоводами Кабардино-Балкарской Республики. Тестирование программы показало применимость сервиса, в частности обеспечение распознавания базовых заболеваний, характерных для яблони, и выдачу рекомендаций по их защите (в том числе и в формате pdf-файла). Реализация сервиса в виде веб-приложения снимает необходимость портирования системы на различные платформы и максимально упрощает взаимодействие с системой. Применение чат-бота еще больше упрощает интерфейс пользователя.

В работе были обучены и протестированы четыре модели на базе архитектур Roboflow 3.0, Yolo v12, Yolo v11 и RF-DETR. Лучшие результаты показала модель на базе Roboflow 3.0 версии: mAP составила 91,0 %, precision – 97,5 %, а recall – 88,5 %. При этом, несмотря на точность распознавания выше 90 %, собранной выборки фотографий недостаточно для достижения применимости модели. На данном этапе планируется сбор дополнительных фотоматериалов в садах республики, полученных в разных погодных условиях и при разном освещении. А в дальнейшем – расширение выборки с учетом различных климатиче-

ских зон КБР и соседних республик, а также за счет охвата всех распространенных в регионе заболеваний и вредителей. Стоит отметить, что дальнейшее развитие сервиса позволит обеспечить его интеграцию с автономными робототехническими системами ухода за растениями [20], например, с автономным роботом по мониторингу и защите посевов [21].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисов И. А. Взаимосвязь воспроизводства кадров предприятий и трудовых ресурсов территорий: пример сельского хозяйства России // *Journal of New Economy*. 2021. Т. 22. № 3. С. 161–183. DOI: 10.29141/2658-5081-2021-22-3-9. EDN: FYAPLA
2. Загазежева О. З., Край К. Ф. Проблемы и перспективы внедрения роботизированных и интеллектуальных технологий в растениеводство // *Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН*. 2021. № 6(104). С. 95–104. DOI: 10.35330/1991-6639-2021-6-104-95-104. EDN: WXLZCP
3. Yağ I., Altan A. Artificial intelligence-based robust hybrid algorithm design and implementation for real-time detection of plant diseases in agricultural environments // *Biology*. 2022. Vol. 11. No. 12. P. 1732. DOI: 10.3390/biology11121732
4. Балаева С. И. Состояние и перспективы развития интенсивного садоводства в Кабардино-Балкарской Республике // *Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова*. 2018. № 1(19). С. 66–70. EDN: YWALOH
5. Turechek W. W. Apple diseases and their management // In book: *Diseases of fruits and vegetables*. Vol. 1. Eds: Naqvi S.A.M.H. Dordrecht: Springer. 2004. DOI: 10.1007/1-4020-2606-4_1
6. Каширская Н. Я., Цуканова Е. М., Каширская А. М. Защита яблони от вредителей и болезней // *Защита и карантин растений*. 2010. № 5. С. 34–35. EDN: MBCNMJ
7. Хуламханов И. М. Влияние климатических факторов на массовый лет яблонной плодовой жорки (*Laspeyresia pomonella* L.) в Кабардино-Балкарской Республике // *Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН*. 2013. № 6-1(56). С. 133–137. EDN: RPXLWV
8. Jashenko R., Tanabekova G., Lu Z. Assessment of biological and ecological characteristics of sievers apple tree pests in Trans-Ili Alatau, Kazakhstan // *Sustainability*. 2023. Vol. 15. No. 14. P. 11303. DOI: 10.3390/su151411303
9. Шереужева М. А., Шереушев М. А., Альбекова З. М. Использование сверточных нейронных сетей для задач автоматического обнаружения заболеваний // *Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН*. 2023. № 5(115). С. 41–51. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-5-115-41-51. EDN: GOUNQN
10. Boniecki P., Zaborowicz M., Pilarska A.A., Piekarska-Boniecka H. Identification process of selected graphic features apple tree pests by neural models type MLP, RBF and DNN // *Agriculture*. 2020. Vol. 10. No. 6. Pp. 218–227. DOI: 10.3390/agriculture10060218
11. Qian Y., Yang B., Wang W. et al. Apple leaf diseases recognition based on an improved convolutional neural network // *Sensors*. 2020. Vol. 20. No. 12. P. 3535. DOI: 10.3390/s20123535
12. Yu H., Cheng X., Chen C., Heidari A. A. et al. Apple leaf disease recognition method with improved residual network // *Multimedia Tools and Applications*. 2022. Vol. 81. No. 2. Pp. 7759–7782. DOI: 10.1007/s11042-022-11915-2
13. Luo Y., Sun J., Shen J. et al. Apple leaf disease recognition and sub-class categorization based on improved multi-scale Feature Fusion Network // *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. Pp. 95517–95527. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3094802
14. Zhang S., Wang D., Yu C. Apple leaf disease recognition method based on Siamese dilated Inception network with less training samples // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2023. Vol. 213. P. 108188. DOI: 10.1016/j.compag.2023.108188

15. Liu B., Fan K., Su W., Peng Y. Two-stage convolutional neural networks for diagnosing the severity of alternaria leaf blotch disease of the apple tree // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. No. 11. P. 2519. DOI: 10.3390/rs14112519
16. Кутырëв А. И. Распознавание и классификация болезней листьев яблони на основе анализа их изображений моделями сверточных нейронных сетей (CNN) // *Вестник Ульяновской ГСХА*. 2023. № 3(63). С. 215–223. DOI: 10.18286/1816-4501-2023-3-215-223
17. Lee Y., Patil M. P., Kim J. G. et al. Hyperparameter optimization of apple leaf dataset for the disease recognition based on the YOLOv8 // *Journal of Agriculture and Food Research*. 2025. Vol. 21. No. 9. P. 101840. DOI: 10.1016/j.jafr.2025.101840
18. Канокова М. А. Анализ эффективности применения программных и робототехнических комплексов для защиты посадок сельскохозяйственных культур от болезней, вредителей и сорной растительности // *Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН*. 2021. № 6(104). С. 126–136. DOI: 10.35330/1991-6639-2021-6-104-126-136
19. Темроков А. З., Тебуев М. Р., Бжихатлов К. Ч. Концепция системы прогнозирования состояния яблоневых садов // *Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции «Цифровая трансформация науки и образования» с международным участием*. Нальчик, 2024. С. 102–110. EDN: CSTJRH
20. Кафиев И. Р., Романов П. С., Романова И. П. Сравнительный анализ роботов для сбора яблок // *Вестник НГИЭИ*. 2024. № 10(161). С. 33–51. DOI: 10.24412/2227-9407-2024-10-33-51. EDN: YHIYRS
21. Bzhikhatlov K., Pshenokova I. Intelligent Spraying System of Autonomous Mobile Agricultural Robot // *Agriculture Digitalization and Organic Production. Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2023. Vol. 362. Pp. 269–278. DOI: 10.1007/978-981-99-4165-0_25

REFERENCES

1. Borisov I.A. The relationship between the reproduction of personnel of enterprises and labor resources of territories: the example of Russian agriculture. *Journal of New Economy*. 2021. Vol. 22. No. 3. Pp. 161–183. DOI: 10.29141/2658-5081-2021-22-3-9. EDN: FYAPLA. (In Russian)
2. Zagazezheva O.Z., Krai K.F. Problems and prospects for the introduction of robotic and intelligent technologies in plant growing. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2021. No. 6(104). Pp. 95–104. DOI: 10.35330/1991-6639-2021-6-104-95-104. EDN: WXLZCP. (In Russian)
3. Yağ I., Altan A. Artificial intelligence-based robust hybrid algorithm design and implementation for real-time detection of plant diseases in agricultural environments. *Biology*. 2022. Vol. 11. No. 12. P. 1732. DOI: 10.3390/biology11121732
4. Balaeva S.I. Status and prospects for the development of intensive gardening in the Kabardino-Balkarian Republic. *News of the Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov*. 2018. No. 1(19). Pp. 66–70. EDN: YWALOH. (In Russian)
5. Turechek W.W. Apple diseases and their management. In book: *Diseases of fruits and vegetables*. Vol. 1. Eds: Naqvi S.A.M.H. Dordrecht: Springer. 2004. DOI: 10.1007/1-4020-2606-4_1
6. Kashirskaya N.Ya., Tsukanova E.M., Kashirskaya A.M. Protection of apple trees from pests and diseases. *Zashchita i karantin rasteniy* [Protection and quarantine of plants]. 2010. No. 5. Pp. 34–35. EDN: MBCNMJ. (In Russian)
7. Khulamkhanov I.M. The influence of climatic factors on the mass flight of the codling moth (*Laspeyresia pomonella* L.) in the Kabardino-Balkarian Republic. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2013. No. 6-1 (56). Pp. 133–137. EDN: RPXLWV. (In Russian)

8. Jashenko R., Tanabekova G., Lu Z. Assessment of Biological and Ecological Characteristics of Sievers Apple Tree Pests in Trans-Ili Alatau, Kazakhstan. *Sustainability*. 2023. Vol. 15. No. 14. P. 11303. DOI: 10.3390/su151411303
9. Shereuzheva M.A., Shereuzhev M.A., Albekova Z.M. The use of convolutional neural networks for automatic diseases detection tasks. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2023. No. 5(115). Pp. 41–51. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-5-115-41-51. EDN: GOUNQN. (In Russian)
10. Boniecki P., Zaborowicz M., Pilarska A.A., Piekarska-Boniecka H. Identification Process of Selected Graphic Features Apple Tree Pests by Neural Models Type MLP, RBF and DNN. *Agriculture*. 2020. Vol. 10. No. 6. Pp. 218–227. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture10060218>
11. Qian Y., Yang B., Wang W. et al. Apple Leaf Diseases Recognition Based on An Improved Convolutional Neural Network. *Sensors*. 2020. Vol. 20. No. 12. P. 3535. DOI: 10.3390/s20123535
12. Yu H., Cheng X., Chen C., Heidari A.A. et al. Apple leaf disease recognition method with improved residual network. *Multimedia Tools and Applications*. 2022. Vol. 81. No. 2. Pp. 7759–7782. DOI: 10.1007/s11042-022-11915-2
13. Luo Y., Sun J., Shen J. et al. Apple Leaf Disease Recognition and Sub-Class Categorization Based on Improved Multi-Scale Feature Fusion Network. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. Pp. 95517–95527. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3094802
14. Zhang S., Wang D., Yu C. Apple leaf disease recognition method based on Siamese dilated Inception network with less training samples. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2023. Vol. 213. P. 108188. DOI: 10.1016/j.compag.2023.108188
15. Liu B., Fan K., Su W., Peng Y. Two-Stage Convolutional Neural Networks for Diagnosing the Severity of Alternaria Leaf Blotch Disease of the Apple Tree. *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. No. 11. P. 2519. DOI: 10.3390/rs14112519
16. Kuttyrev A.I. Recognition and classification of apple leaf diseases based on the analysis of their images by convolutional neural network (CNN) models. *Vestnik Ul'yanovskoy GSKHA [Bulletin of the Ulyanovsk State Agricultural Academy]*. 2023. No. 3(63). Pp. 215–223. DOI: 10.18286/1816-4501-2023-3-215-223. (In Russian)
17. Lee Y., Patil M. P., Kim J. G. et al. Hyperparameter optimization of apple leaf dataset for the disease recognition based on the YOLOv8. *Journal of Agriculture and Food Research*. 2025. Vol. 21. No. 9. P. 101840. DOI: 10.1016/j.jafr.2025.101840
18. Kanokova M.A. Analysis of the effectiveness of the use of software and robotic systems for the protection of agricultural crops from diseases, pests and weeds. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2021. No. 6(104). Pp. 126–136. DOI: 10.35330/1991-6639-2021-6-104-126-136. (In Russian)
19. Temrokov A.Z., Tebuev M.R., Bzhikhatlov K.Ch. Concept of a system for forecasting the state of apple orchards. *Sbornik nauchnykh trudov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Tsifrovaya transformatsiya nauki i obrazovaniya» s mezhdunarodnym uchastiyem*. [Collection of scientific papers of the All-Russian scientific and practical conference “Digital transformation of science and education” with international participation]. Nalchik, 2024. Pp. 102–110. EDN: CSTJRH. (In Russian)
20. Kafiev I.R., Romanov P.S., Romanova I.P. Comparative analysis of robots for apple picking. *Vestnik NGIEI [Bulletin NGIEI]*. 2024. № 10(161). Pp. 33–51. DOI: 10.24412/2227-9407-2024-10-33-51. EDN: YHIYRS. (In Russian)
21. Bzhikhatlov K., Pshenokova I. Intelligent Spraying System of Autonomous Mobile Agricultural Robot. *Agriculture Digitalization and Organic Production. Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2023. Vol. 362. Pp. 269–278. DOI: 10.1007/978-981-99-4165-0_25

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was conducted without sponsorship.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Информация об авторах

Темроков Айдемир Залимханович, магистрант 2-го года обучения направления «Информатика и вычислительная техника», Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х. М. Бербекова; 360004, Россия, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173;

temrokovaydemir@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2272-475X>, SPIN-код: 4961-2069

Бжихатлов Кантемир Чамалович, канд. физ.-мат. наук, зав. лабораторией «Нейрокогнитивные автономные интеллектуальные системы», Кабардино-Балкарский научный центр РАН;

360002, Россия, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2;

haosit13@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0924-0193>, SPIN-код: 9551-5494

Information about the authors

Aidemir Z. Temrokov, 2nd year Student in the field of Informatics and Computer Science, Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov;

360004, Russia, Nalchik, 173 Chernyshevsky street;

temrokovaydemir@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2272-475X>, SPIN-code: 4961-2069

Kantemir Ch. Bzhikhatlov, Candidate of Physics and Mathematics sciences, Head of the Laboratory of Neurocognitive Autonomous Intelligent Systems, Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

360010, Russia, Nalchik, 2 Balkarov street;

haosit13@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0924-0193>, SPIN-code: 9551-5494

===== АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ =====
И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 004.89

Обзорная статья

DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-2-37-54

EDN: HNHAUJ

**Роль технологий искусственного интеллекта
в цифровой трансформации российского производства**

**Н. А. Ребус^{✉1,2}, И. Г. Благовещенский²,
О. В. Ратанова¹, Ф. А. Мастяев¹**

¹Московский финансово-промышленный университет «Синергия»
125315, Россия, Москва, Ленинградский проспект, 80, корп. Е

²Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)
125080, Россия, Москва, Волоколамское шоссе, 11, корп. А

Аннотация. Цифровая трансформация бизнеса означает перевод многих процессов на предприятии в цифровой вид, т.е. предполагается выполнение процессов с использованием компьютерной техники и ИТ-технологий. При этом важно организовать эффективную интеграцию уже имеющихся на предприятии процессов с современными ИТ-технологиями. Такая интеграция может касаться не только производства, но и других областей человеческой деятельности. Конечно, и раньше многие отрасли в разной мере подвергались автоматизации, но появление искусственного интеллекта (ИИ) может сгладить разницу между отраслями с автоматизацией разной степени и позволит оптимизировать процессы, даже если какие-то из сфер деятельности не предполагают использование ИИ. Тем не менее процесс цифровизации в подавляющем большинстве случаев даст ускорение принятию решений, если использовать системы ИИ, в частности цифрового двойника. Это оптимизирует сбор данных, что позволит использовать их для создания моделей объектов или систем. Модель в дальнейшем будет применяться для анализа и оптимизации работы без физического присутствия объекта. Все вышеизложенное и определяет актуальность темы идентификации места и роли искусственного интеллекта в цифровой трансформации российского бизнеса. В данной статье авторы размышляют над проблемой «Какие шаги необходимо предпринять для развития новых технологий анализа данных в производстве? И как усовершенствовать среду работы с данными?». В статье дается обзор истории использования искусственного интеллекта в бизнесе. Обсуждаются слабые стороны применения технологий искусственного интеллекта. Предпринимается попытка дать ответ на вопрос: что нужно сделать уже сегодня, чтобы предприятие или организация могли занять лидирующие позиции завтра.

Ключевые слова: искусственный интеллект, цифровые двойники, большие данные, машинное обучение, модель машинного обучения

Поступила 12.03.2025, одобрена после рецензирования 02.04.2025, принята к публикации 04.04.2025

Для цитирования. Ребус Н. А., Благовещенский И. Г., Ратанова О. В., Мастяев Ф. А. Роль технологий искусственного интеллекта в цифровой трансформации российского производства // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2025. Т. 27. № 2. С. 37–54. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-2-37-54

The role of artificial intelligence technologies in digital transformation of Russian production

N.A. Rebus^{✉1, 2}, I.G. Blagoveshchenskiy²,
O.V. Ratanova¹, F.A. Mastyaev¹

¹Moscow Financial and Industrial University "Synergy"
125315, Russia, Moscow, 80 Leningradsky avenue, building E

²Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH)
125080, Russia, Moscow, 11 Volokolamsk shosse, building A

Abstract. The digital transformation of a business means the digitization of many processes in an enterprise, i.e. it assumes the implementation of processes using computer technology and IT technologies. At the same time, it is important to organize the effective integration of existing processes in the enterprise with modern IT technologies. Such integration may concern not only production, but also other areas of human activity. Of course, many industries have been automated to varying degrees before, but the advent of artificial intelligence (AI) can smooth out the difference between industries with varying degrees of automation and optimize processes, even if some of the fields of activity do not involve the use of AI. Nevertheless, the process of digitalization in the vast majority of cases will accelerate decision-making if AI systems are used, in particular a digital twin. This optimizes data collection, which will allow them to be used to create models of objects or systems. In the future, the model will be used to analyze and optimize work without the physical presence of an object. All of the above determines the relevance of the topic of determining the role of artificial intelligence in the transformation of Russian business. In this article, the authors reflect on the problem "What is needed for the development of new data analysis technologies in production? And how can we improve the data environment?" The article provides an overview of the history of the use of artificial intelligence in business. The weaknesses of using artificial intelligence technologies are discussed. An attempt is being made to answer the question of what needs to be done today so that an enterprise or organization can take a leading position tomorrow.

Keywords: artificial intelligence, digital twins, big data, machine learning, machine learning model

Submitted 12.03.2025,

approved after reviewing 02.04.2025,

accepted for publication 04.04.2025

For citation. Rebus N.A., Blagoveshchenskiy I.G., Ratanova O.V., Mastyaev F.A. The role of artificial intelligence technologies in digital transformation of Russian production. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2025. Vol. 27. No. 2. Pp. 37–54. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-2-37-54

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время производственные и другие процессы учреждений по большей части автоматизированы. При этом автоматизация позволяет выполнять операции, недоступные человеку. В процессе автоматизации большую роль играет информационная составляющая, т.е. данные. Искусственный интеллект в процессе автоматизации может использоваться для обработки и анализа данных. В различных бизнес-процессах ИИ сможет анализировать и прогнозировать поведение клиентов, оптимизировать как сами бизнес-процессы, так и расходы и доходы от них. Совершенствование бизнес-процессов с помощью ИИ предполагает не просто автоматизацию рабочих мест, но и прогнозирование, в том числе предотвращение сбоев, улучшение клиентского сервиса, более рациональное использование ресурсов, повышение эффективности логистики и складской деятельности и т.п.

Если рассматривать разные сферы деятельности, то на текущий момент есть области применения, где ИИ превосходит человека, и области, где человек лидирует. Например, ИИ лучше людей распознает образы, работает с текстами, проводит диагностику. А человек лидирует в сложных задачах, которые требуют интуитивного понимания контекста, креативности, т.е. создает новые концепции. Также человек проявляет адаптивность и может правильно реагировать на неожиданные ситуации [1]. И в этих условиях совместная работа человека и ИИ будет намного эффективнее. ИИ-помощники повысят эффективность интеллектуального труда человека и трансформируют не только производство, но и другие сферы человеческой жизни.

Президент РФ В. В. Путин неоднократно говорил о целесообразности и актуальности цифровой трансформации. И важную роль в этом процессе играет ИИ. В. В. Путин отметил, что «в наступающее десятилетие нам предстоит провести цифровую трансформацию всей страны, всей России, повсеместно внедрить технологии искусственного интеллекта, анализа больших данных»¹.

В России принята Национальная стратегия развития искусственного интеллекта на период до 2030 года, в которой определены основные направления развития искусственного интеллекта, принципы развития, цели и основные задачи развития. Искусственный интеллект – комплекс технологических решений, позволяющий имитировать когнитивные функции человека (включая самообучение и поиск решений без заранее заданного алгоритма) и получать при выполнении конкретных задач результаты, сопоставимые, как минимум, с результатами интеллектуальной деятельности человека².

На сегодняшний день использование ИИ выходит за пределы научно-исследовательских лабораторий и IT-компаний. Многие компании, как зарубежные, так и российские, внедряют в свои проекты ИИ, нейронные сети и обработку больших данных, используя самые современные алгоритмы. В настоящее время множество отраслей используют эти технологии, благодаря которым можно усовершенствовать организацию бизнес-процессов компании, снизить затраты и улучшить позиции среди конкурентов [2].

Для интенсификации развития ИИ в России в университетах создаются новые специальности, открываются исследовательские лаборатории. И занимается этим не только государство, но и бизнес. В 2021 году Сбербанк открыл институт, где изучается ИИ³. В ноябре 2021 года Институт ИИ представил первые результаты своих проектов на международной онлайн-конференции по искусственному интеллекту и анализу данных Artificial Intelligence Journey 2021.

ИИ можно представить на разных слоях детализации его деятельности как машину, способную:

- получать информацию о мире и интерпретировать ее через сенсорные датчики, например, распознавать изображения и звук;
- конструировать новые объекты, например, создавать изображения, видео и генерировать тексты на заданные темы;
- находить решения интеллектуальных задач, например, просчитывать оптимальные ходы в шахматах или игре го [12].

¹Путин заявил о необходимости цифровой трансформации России [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://tass.ru/ekonomika/10172635>

²О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации: Указ Президента от 10.10.2019 г. N 490. Информационно-правовой портал «Гарант». Режим доступа: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72738946>

³Искусственный интеллект в Сбербанке [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://clck.ru/XVJDJ>

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Развитие ИИ началось в 50-х годах XX века. Тогда американский нейрофизиолог Фрэнк Розенблатт разработал концепцию перцептрона как математическую модель нейрона человеческого мозга. Это была простейшая однослойная форма нейронной сети, которую можно использовать для двоичной классификации. В 1957 году была смоделирована работа перцептрона на компьютере IBM, это была уже многослойная модель. Модель распознавала буквы латинского алфавита, что было воспринято с воодушевлением и бизнес-сообществом, и государством. Более поздние исследования головного мозга пришли к выводу, что человеческий мозг устроен значительно сложнее. И в развитии перцептрона как модели человеческого мозга на тот момент не удалось преуспеть, что породило отсутствие финансирования дальнейших разработок в этом направлении.

Следующий скачок в развитии ИИ был в начале 80-х годов, когда популярны были и развивались экспертные системы (ЭС). Это программы, использующие наборы правил и алгоритмы, имитирующие процессы мышления специалиста-эксперта при решении определенной задачи. Для создания ЭС нужно провести извлечение знаний из экспертов и документации, чтобы накопить данные о том, как эксперты решают конкретные задачи. Например, правила, по которым психолог задает вопросы и отвечает пациенту, или признаки и анализы, по которым врач ставит диагноз. Полученные правила решения задач реализовывались в виде прототипа ЭС. Прототип включал в себя базу знаний и алгоритм их обработки. Развитие экспертных систем, как и перцептрона, также быстро замедлилось, а с ним и развитие ИИ вновь застыло на одном месте. Однако использование ЭС все еще продолжается в некоторых сферах человеческой деятельности. Например, ЭС используются и эффективны в областях, где требуются надежность, глубокое понимание и анализ данных.

Следующий этап развития ИИ начался в середине 90-х годов XX века. В это время произошел скачок в развитии элементной базы вычислительной техники, что повлекло за собой увеличение вычислительных мощностей компьютеров. Благодаря развивающейся технологии создания компьютеров, как то элементная база и архитектура процессоров, стало возможным применение сложных математических методов для расчета все более сложных задач. ИИ начал использоваться в бизнес-процессах различных сфер деятельности человека. Например, сложные расчеты могут применяться в логистике, финансовой и банковской сфере, фармацевтике и генной инженерии. Громким достижением стало появление шахматного суперкомпьютера Deep Blue, разработанного компанией IBM. 11 мая 1997 года Deep Blue победил действующего чемпиона мира по шахматам Гарри Каспарова. Алгоритм был основан на переборе всех вариантов ходов и поиске самого оптимального из них. Для этого требовалась огромная скорость вычислений, чего нельзя было бы достичь только алгоритмически, без прорыва в технологической сфере.

В начале XXI века настал следующий этап развития ИИ. Акцент сместился в сферу обработки данных. На передний план в развитии ИИ вышли такие понятия, как большие данные и машинное обучение, что стало фактором ускорения развития алгоритмов ИИ. Машинное обучение в отличие от экспертных систем основано на обработке большой базы данных, что приводит к совершенствованию алгоритма без программирования. Что позволяет настроить алгоритм так, что он выдает правильные решения в большинстве ситуаций [3].

В 2011 году компания IBM разработала компьютерную систему IBM Watson. Это когнитивная система, способная отвечать на вопросы на человеческом языке, она может

анализировать данные, делать на их основе выводы и обучаться. Система участвовала в популярном американском телешоу «Jeopardy!» (русский аналог – «Своя игра») и победила чемпионов этой игры. Система Watson используется в медицине для диагностики и лечения рака.

В 2015 году компания Google DeepMind разработала AlphaGo – программу для игры в го. Правила го кажутся простыми, но на самом деле эта игра сложнее, чем шахматы. В ней существует множество возможных вариантов, что затрудняет оценку позиции и использование алгоритма поиска ходов, который использует Deep Blue. AlphaGo стал первым проектом в мире, выигравшим соревнование для профессиональных игроков в го в 2016 году. Первая версия AlphaGo работала с использованием двух нейросетей: одна вычисляла вероятность ходов, а вторая оценивала позицию камня на доске. AlphaGo использует метод Монте Карло – поиск по дереву с оценкой в узлах. Но AlphaGo еще использует оценочные функции для оптимизации перебора. Вот эти функции используют глубокое обучение. В качестве обучающих данных использовалась информация об успешных ходах 160 тысяч партий профессионалов. Новая версия программы – АльфаГо Zero – работает на основании обучения с подкреплением. Программа не использует данные от игроков-людей, она учится сама. АльфаГо – это большой прорыв в развитии ИИ, который ожидали не раньше 2025 года.

В мае 2020 года исследователи из OpenAI показали алгоритм GPT-3. Он способен генерировать грамматически корректные англоязычные тексты на основе совсем небольшого количества примеров. Тексты при этом получаются очень похожими на написанные человеком, и это несмотря на то, что алгоритм фактически генерирует случайные предложения. GPT-3 может отвечать на вопросы, переводить языки и выполнять другие задачи по обработке текста на естественном языке.

В том же 2020 году компания Google DeepMind разработала программу AlphaFold, которая выполняет предсказания пространственной структуры белка. Эта задача является одной из сложнейших и важнейших в современной биологии. AlphaFold 3 характеризуется более высокой точностью и лучшими показателями прогнозирования.

СТАТИСТИКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

ИИ базируется на различных областях традиционных наук, таких как математика (в том числе статистика и теория вероятности), физика (обработка сигналов), биология, лингвистика, психология и другие.

Почти все исследователи считают, что ИИ человеческого уровня реален и когда-нибудь станет неизбежным. Согласно аналитическому отчету по внедрению решений в области искусственного интеллекта в отраслях промышленности Федерального центра прикладного развития искусственного интеллекта за 2024 год появление ИИ, близкого к человеческому, возможно к 2047 году. К 2027 году такой ИИ, скорее всего, не появится, вероятность этого около 10 %.

Гипотеза масштабирования предполагает, что развитие ИИ – это вопрос масштабирования уже существующих архитектур. Т.е., применяя традиционные алгоритмы обучения в более широком масштабе, можно получить все более сложные нейронные сети, и они естественным образом разовьют сложное поведение. Это дает надежду на создание чрезвычайно мощных систем ИИ в течение следующего десятилетия [4].

Интернет-сервисы и социальные сети уже активно применяют ИИ для персонализации контента и других задач.

В некоторых отраслях ИИ уже стал стандартом, тогда как в других его применение лишь начинает развиваться. С каждым годом интерес к ИИ возрастает, и его внедрение продолжается. Процент использования искусственного интеллекта (ИИ) в различных областях может варьироваться в зависимости от региона, конкретной индустрии и технологических достижений. Доля компаний в мире, которые внедрили и используют ИИ, в настоящее время составляет 55 %.

Были оценены причины, по которым компании внедряют ИИ в рабочие процессы. Для 25 % компаний это нехватка специалистов требуемой квалификации, а 20 % компаний делают это под давлением ожиданий клиентов или из-за конкуренции⁴. В таблице 1 представлены сводные данные по причинам внедрения ИИ на предприятиях.

Таблица 1. Причины внедрения ИИ в бизнес

Table 1. Reasons for implementing AI in business

Причина внедрения ИИ в бизнес	Доля компаний
Повышение доступности бизнеса	45 %
Снижение расходов и автоматизация бизнес-процессов	42 %
Использование ИИ в стандартных бизнес-приложениях	37 %
Увеличение конкурентоспособности на рынке	31 %

Применение ИИ с точки зрения 65 % компаний повышает эффективность их работы. 54 % пользователей считают, что ИИ улучшает качество текста, может повысить креативность и ускорить процесс создания текста. Предположение компаний об эффективности внедрения ИИ подтверждают исследования Forbes:

- внедрение ИИ в производство повышает эффективность на 12 %, что позволяет компаниям добиваться лучших результатов по сравнению с партнерами и конкурентами;
- внедрение ИИ в процесс проектирования, разработки и производства продукции приводит к экономии в 30 раз больше, чем у конкурентов, не применяющих ИИ.

И в гонке с конкурентами побеждают компании, которые первыми внедрили ИИ в бизнес-процессы. Они добились большей экономии средств, сократили время обработки заказов, привлекли больше клиентов и увеличили объемы продаж.

Исследователи ИИ, основываясь на статистике, прогнозируют, что к 2035 году прибыль в некоторых отраслях, использующих ИИ, увеличится на более чем 44 %⁵. Максимальный эффект от ИИ получают: образование, сфера питания, строительство, торговля и здравоохранение (рис. 1).

⁴Статистика искусственного интеллекта (2025), Инклиент, 01.01.2025 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://inclient.ru/ai-stats/>

⁵Статистика искусственного интеллекта (2025), Инклиент, 01.01.2025 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://inclient.ru/ai-stats/>

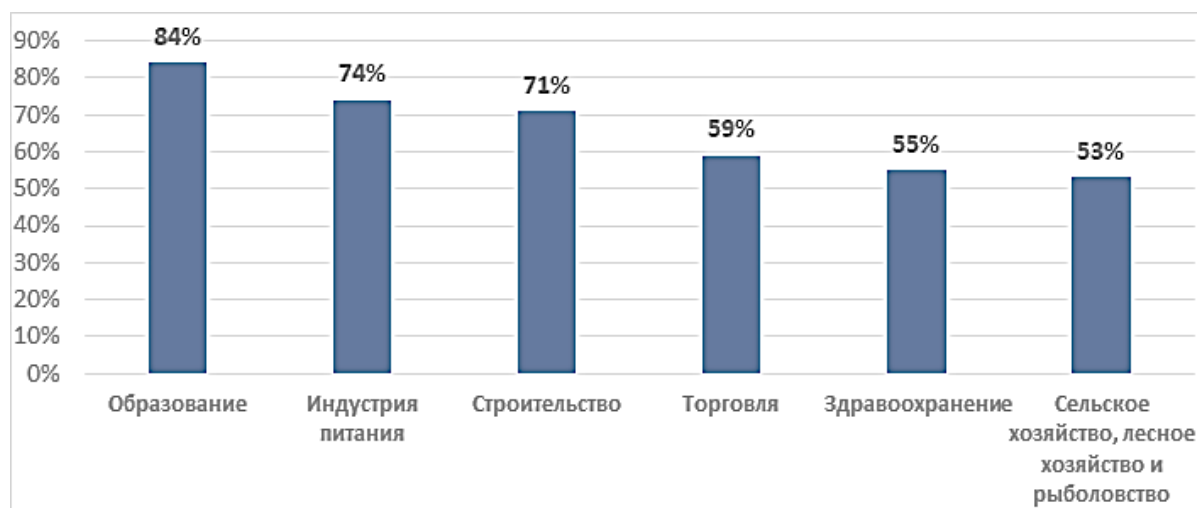


Рис. 1. Доля использования ИИ в разных отраслях

Fig. 1. Share of AI use in different industries

Рассмотрим влияние внедрения ИИ на рынок труда. В половине существующих вакансий умение пользоваться ИИ будет конкурентным преимуществом при приеме на работу. Как уже говорилось, внедрение ИИ будет повышать производительность труда, а это влечет за собой не только преимущества для работодателя, но и риски для работников. Риски будут связаны с уменьшением числа вакансий и возможным сокращением заработной платы для не владеющих навыками работы с ИИ работников. То есть внедрение ИИ может заменить людей на рабочих местах, что приведет к безработице. Так как ИИ внедряется чаще в самых развитых странах, то эти проблемы коснуться именно их. Считается, что потерять работу могут 400 млн человек. Также есть риск того, что некоторые профессии просто исчезнут [13].

Следует отметить, что будут автоматизированы рабочие места, не требующие высокой квалификации, т.к. высококвалифицированные работники, скорее всего, уже используют какие-то средства автоматизации и ИИ. Т.е. влиянию прогресса, как всегда и бывает в исторической перспективе, больше подвержены низкоквалифицированные профессии, которые и будут исчезать. Но это не обязательно критически сократит рабочие места, т.к. будут появляться новые задачи и рабочие места, требующие другого набора навыков. Вместо исчезнувших профессий будут появляться новые. По прогнозам, в 2025 году благодаря ИИ появится работа для 97 млн человек.

ОБЛАСТИ РАЗВИТИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

На данный момент развития науки ученые не могут с уверенностью утверждать, как устроен человеческий мозг на 100%. Исследования не прекращаются. Поэтому и создать цифровую модель человеческого мозга, т.е. искусственный интеллект (ИИ), на данный момент нельзя. Однако можно имитировать некоторые функции мозга. Например, вычислительные способности мозга, и ИИ по вычислительным возможностям превосходит человека. ИИ также пытается имитировать аналитические способности мозга [5].

Разработка ИИ ведется в нескольких направлениях. Хотя все они, конечно, связаны друг с другом. На рисунке 2 представлено взаимное расположение этих технологий.

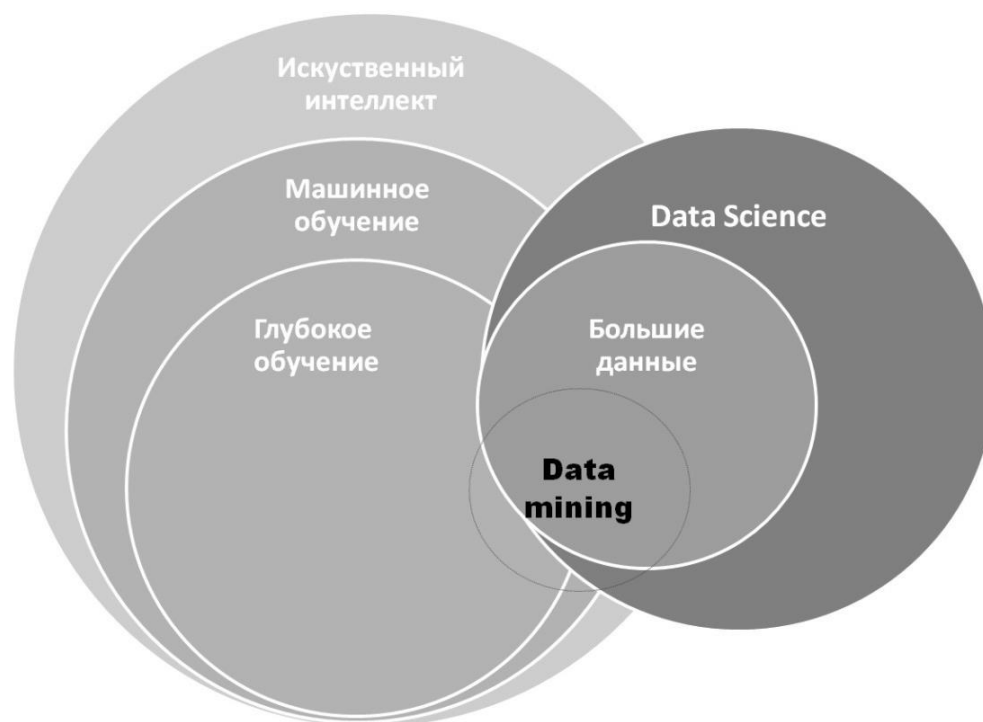


Рис. 2. Области развития искусственного интеллекта

Fig. 2. Areas of development of artificial intelligence

Машинное обучение – раздел ИИ, который отвечает за решение задач с помощью анализа и интерпретации данных без программирования. Обучение алгоритма происходит на примерах правильно решенных задач.

Глубокое обучение (от англ. Deep learning) – вид машинного обучения с использованием нейронных сетей. Отличается от машинного обучения отсутствием учителя в процессе обучения. Нейросеть находит правильное решение сама [6].

Data Science (наука о данных, DS) – раздел ИТ-науки, связанный со сбором данных, с методами обработки больших объемов данных, анализом данных для получения практических результатов. Методы DS на основе объединения статистики, анализа данных, машинного обучения и анализа реальных явлений находят закономерности в большом объеме данных и строят прогнозы.

Data Mining (интеллектуальный анализ данных) – методы анализа больших объемов данных и поиска в них закономерностей и других характеристик. Анализ проводится с помощью статистических и математических методов. Цель анализа – нахождение скрытых закономерностей и тенденций, которые могут использоваться для принятия решений.

Большие данные (Big Data, BD) – это массивы информации, а также обработка, хранение и анализ огромных объемов данных. Под BD понимают именно такой объем информации, что обычные методы работы с ней становятся неэффективными. Принято относить к BD данные, объем которых превышает 150 Гб в сутки.

МОДЕЛЬ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Если рассматривать применение ИИ в бизнесе, то в большинстве случаев применяются технологии машинного обучения (Machine Learning). Это метод обучения, при котором используются шаблоны и логические выводы решения подобных задач. При этом не ис-

пользуются прямыми указаниями и программированием. Во время машинного обучения алгоритмы обнаруживают закономерности в больших наборах данных, а также учатся принимать оптимальные решения и созданию прогнозов на основе этого анализа.

Обучить модель машинного обучения невозможно без большого количества информации или данных. Совокупность всех имеющихся данных для решения задачи называют датасетом (по-английски dataset).

Размеченные данные – это данные, по которым можно дать точный ответ для поставленной задачи. Решение задач с помощью размеченных данных называется обучением с учителем (Supervised Learning). Это самый распространенный и исследованный подход к решению задач машинного обучения.

Модель машинного обучения – это некоторый математический алгоритм с множеством параметров. Обучить модель – значит подобрать наилучшие значения параметров. Для каждой конкретной задачи модель обучается отдельно. Например, модель можно строить для предсказания цены недвижимости или ранжирования отелей.

Процесс машинного обучения следующий: есть большой массив примеров правильной работы вида «входные данные – выходные данные»; обработка этих данных настраивает алгоритм. После обучения алгоритм способен по набору входных данных предсказать выходные. Обучение в данном случае – это процесс настройки алгоритма.

Поиск и создание методов обучения алгоритма – это фактически область прикладной математики, результаты которой применяются в информационных технологиях.

Обучение моделей машинного обучения, как правило, требует затрат больших ресурсов – информационных (большие данные), временных и вычислительных. В отдельных случаях можно обучить модель за относительно небольшой промежуток времени на небольших массивах данных и на персональном компьютере. Но это частный случай, а если речь идет о сложных процессах, крупных предприятиях и обработке огромных массивов данных (например, данных о миллионах клиентов), то потребуются специальные технические средства (сервер). И даже при наличии специализированных программно-технических средств обработка большого массива данных может быть длительностью до недель. Крупные компании, как правило, покупают специализированные серверы и нанимают команду специалистов для работы с ними. Менее крупные компании, как правило, арендуют такие сервисы в облаке, через интернет.

Обычно в крупных компаниях есть собственная команда штатных дата-саентистов (от англ. Data Science – этот термин не имеет точного короткого перевода на русский язык). Такие специалисты должны иметь специфический опыт – опыт обучения модели или настройки алгоритмов. Если же заказчик нанимает сторонних специалистов, то их снабжают данными, которые описывают суть задачи. Заказчик устанавливает метрики, а исполнитель строит модели и, возможно, внедряет их в рабочий процесс.

Сложность модели машинного обучения зависит от решаемой ею задачи. При этом важным параметром является качество самих данных. Особенно важно, чтобы данные были однородными и без ошибок при обучении небольших моделей.

Одной из трудностей при машинном обучении представляется предметная область каждой конкретной задачи. В каждом отдельном случае обучения модели нужно, кроме чистоты данных, сочетание двух человеческих факторов. Первое – это изучение предметной области специалистами по настройке моделей, второе – это понимание применимости и ограничений использования ИИ в данной области заказчиком [11].

Есть два основных направления ИИ, которые чаще всего используют в бизнесе, – это автоматизация и прогнозирование.

При автоматизации ИИ ускоряет обработку данных: анализирует и сортирует отзывы о продукте, строит по отзывам статистику, а также расставляет приоритеты на негативные отзывы, на которые нужно отвечать (например, жалобы, претензии, рекламации), и т.п.

Прогнозирование – это процесс составления предположений о будущем состоянии объекта, основанный на предыдущем и настоящем опыте. Человеческий мозг способен на прогнозирование, но для качественного анализа больших данных человеку понадобится слишком много времени. Вычислительные мощности компьютера несопоставимы с человеческими, поэтому применение искусственного интеллекта делает решение этой задачи быстрее и качественнее. Кроме того, искусственный интеллект оценивает задачу беспристрастно.

Интеллектуальные системы, такие как машинный перевод текста на другой язык, распознавание изображений и речи, прогнозирование поведения клиентов и другие, основаны на обучении модели на основе данных.

Существует еще одна альтернатива алгоритмам машинного обучения – экспертные системы. В экспертных системах алгоритм прогнозирования основан на знаниях эксперта-человека. Экспертные системы фактически имитируют процесс принятия решений экспертами и рекомендуют решения, аналогичные тем, которые дал бы человек. На практике специалисты приходят к выводу: когда нужно ответить на вопросы в очень конкретной, ограниченной области, для которой требуется всего несколько правил для экспертной системы, экспертные системы относительно эффективны, обладают небольшой сложностью и работают в реалистичных временных рамках. Когда же задача или предметная область становится более сложной, то количество необходимых правил взрывообразно возрастает, что может привести к созданию больших деревьев поиска или подобным проблемам. Таким образом, методы машинного обучения лучше, чем экспертные системы, адаптируются к более сложным задачам с большим количеством переменных.

Если представить компанию, которая уже давно работает в определенной области, то можно предположить, что у нее накопилось достаточное количество данных. Эти данные можно использовать для обучения модели, которая будет выполнять прогнозирование, либо на основе таких данных можно автоматизировать какие-либо процессы в компании. Использование накопленных данных и их обработка могут быть двигателем развития процессов в компании. Как правило, речь идет о таком количестве данных, которое невозможно обработать просто на компьютере.

Одной из проблем машинного обучения является отсутствие или малое количество данных, например, если данных для решения конкретной задачи в компании нет, их не сохраняли или такая задача в компании не решалась. В таких случаях требуется:

- поиск альтернативных открытых источников данных,
- приобретение или заказ данных,
- использование синтетических данных,
- применение методов увеличения данных.

Еще один способ решения этой проблемы – применение методов, позволяющих работать с ограниченным количеством данных.

Другой проблемой использования данных может стать безопасность. Это случай, когда данные в компании есть, но выдать доступ разработчикам к ним нельзя. Способ решения такой проблемы нужно продумать на стадии проектирования, до начала реализации проекта.

Внедрение в бизнес-процессы искусственного интеллекта не может быть универсальным решением всех проблем. Эффективность и точность алгоритмов искусственного интеллекта во многом зависят от качества и объема данных, а также от контекста их использования. Поэтому важно осознавать ограничения искусственного интеллекта и внедрять его с осторожностью, оценивая при этом потенциальные риски.

По оценкам некоторых экспертов в области ИИ, около половины проектов, связанных с попытками внедрения ИИ в процессы компании, не приводят к ожидаемым результатам. Основные причины таких неудач: нереалистичные ожидания, недостаточный объем данных, некачественные или неадекватные данные.

И даже если количества данных и ресурсов достаточно для решения задачи и процесс настройки алгоритма был проведен без проблем, то проект все равно может не достигнуть эффективности. Данные могут быть качественными, но в них может не оказаться зависимостей, по которым можно предсказать результат [7].

Часто для управления проектами по анализу данных используют популярную методологию CRISP-DM.

Схема этапов работы над проектом на рисунке 3.



Рис. 3. Схема этапов работы над проектом по методологии CRISP-DM

Fig. 3. Scheme of stages of work on a project using the CRISP-DM methodology

Выделяют шесть этапов решения бизнес-задачи с использованием алгоритмов искусственного интеллекта:

- понимание бизнес-целей;
- сбор и изучение данных;
- подготовка данных;
- обучение и настройка алгоритма;
- тестирование и оценка качества работы алгоритма;
- внедрение разработанного алгоритма.

Системы машинного обучения могут работать в связке с устройствами Интернета вещей (IoT), получая данные в реальном времени для анализа и оптимизации рабочих процессов.

Для оптимизации обработки данных часто используют не последовательную обработку данных о миллионах клиентов, а параллельную обработку данных. Такую обработку можно организовать с помощью облачных сервисов, используя распределенное хранение данных, например, в Hadoop или Spark. Модуль SparkML – это библиотека, которая позволяет реализовать модель, может решать задачи классификации и регрессии. Библиотека SparkML имеет нативный API для Scala, Python API, R и развивается.

В машинном обучении в большинстве случаев используется язык программирования Python⁶ и его библиотеки: Numpy, Scikit-learn, TensorFlow, PyTorch. Например, NumPy – это числовая библиотека с открытым исходным кодом, которая может использоваться для выполнения различных математических операций с различными матрицами. NumPy считается одной из наиболее часто используемых научных библиотек, поэтому многие специалисты по обработке данных полагаются на нее при анализе данных.

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ

Управление деятельностью предприятия – как в целом, так и отдельными процессами – сегодня опирается на применение глубокой аналитики и моделирования поведения внутренней и внешней среды. Сложность решаемых задач растет, а их границы размываются, и внедрение интеллектуальных систем становится насущной необходимостью. Количество наблюдаемых параметров используемых моделей растет лавинообразно, и традиционные технологии сбора, накопления, обработки и анализа информации не в состоянии обеспечить своевременность и/или эффективность вырабатываемых решений. Технология цифровых двойников призвана решить эти проблемы [14].

Цифровой двойник представляет собой модель объекта из реального мира, поддерживаемую в виртуальной среде [8]. Модель использует сенсорную сеть датчиков для обновления своего статуса в режиме реального времени, фиксирует изменения параметров объекта и передает эту информацию на сервер. Специальная программа на сервере обрабатывает полученную информацию и строит прогноз результатов. Цифровые двойники, как и другие методы моделирования, позволяют моделировать и анализировать различные ситуации, тестировать нужные функции на модели в виртуальной среде до их фактической разработки.

Цифровой двойник работает на основе подробной аналитической модели, построенной на основе имитационного моделирования, больших данных, машинного обучения, модели виртуальной, дополненной или расширяемой реальности [15]. В этой модели описываются параметры реального объекта для различных сценариев использования этого объекта. Модель также должна содержать методы обновления содержимого цифрового двойника на протяжении всего жизненного цикла. Цифровой двойник должен в своем составе иметь API, предоставляющее возможности по обмену данными, управлению его состоянием или выполнению действий над ним. Поскольку информация для обновления состояния цифрового двойника может поступать из самых разнообразных источников и по различным каналам связи, а их состав и наполнение могут со временем изменяться, то необходимо разработать инструментальные средства анализа и оценки достоверности поступающей информации. Также необходимо предусмотреть возможности по обмену данными между различными цифровыми двойниками, функционирующими в одной и той же виртуальной среде.

⁶10 Best Language for Machine Learning – GeeksforGeeks, [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.geeksforgeeks.org/best-language-for-machine-learning/

Развертывание цифрового двойника выполняется в несколько этапов. Первый этап представляет собой сбор данных о наблюдаемом объекте реального мира. В качестве источников данных на этом этапе могут выступать сети датчиков и/или измерительных приборов, базы и банки данных, Интернет вещей и т.п.

В ходе второго этапа происходит построение модели с использованием доступных методов обработки данных. Конкретное представление модели зависит от возможностей используемой среды моделирования – математическая или имитационная модель; графическая модель, например трехмерная, или модель дополненной либо виртуальной реальности и т.д.

В ходе третьего этапа необходимо обеспечить интеграцию цифрового двойника в информационную систему организации, совместно с которой цифровой двойник должен будет работать, – для этого цифровой двойник должен работать под используемыми в компании операционными системами, с системами управления базами данных, сетевой инфраструктурой, лингвистическим обеспечением информационной системы.

При развертывании и использовании цифровых двойников нужно уделять особое внимание информационной безопасности. Цифровой двойник должен предлагать различные сценарии защиты от воздействия внешних негативных факторов – как самого себя, так и моделируемого объекта реального мира.

ЭТИКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Активное внедрение ИИ в повседневную жизнь вызывает тревогу и недоверие людей. Рядовые пользователи опасаются, что ИИ может нанести вред их интересам. В России доля людей, которые доверяют ИИ, – 48 %, а доля тех, кто не доверяет ИИ, – 42 %.

При работе систем с ИИ людей чаще всего беспокоят следующие потенциальные проблемы:

- сбой оборудования или ПО, т.е. технические проблемы;
- общение с роботами вместо живых людей и в связи с этим деградация личности;
- боязнь непонимания роботом проблем человека и в связи с этим отсутствие помощи и личной безопасности;
- боязнь имитации роботом человека;
- непонимание, что такое ИИ, как он работает и зачем нужен;
- боязнь, что ИИ станет умнее человека;
- боязнь, что ИИ заменит человека на работе;
- возможность взлома, хищение персональных данных [9].

Последний пункт беспокоит людей и без использования ИИ, но разговоры о внедрении ИИ только усиливают тревогу. Любые технологии сначала пугают людей. Большой процент людей, не доверяющих ИИ, характерен не только для России. Так же обстоят дела во всех странах, где внедряется ИИ. Поэтому вопрос этики ИИ затрагивает как компании, занятые разработками в области ИИ, так и государства⁷.

Ответственность за последствия применения ИИ всегда лежит на человеке.

Большие данные, Интернет вещей, искусственный интеллект, беспроводная связь, виртуальная и дополненная реальность, квантовые вычисления – все эти и многие другие технологии формируют основу концепции «Индустрия 4.0».

⁷В погоне за искусственным интеллектом. Кто победит в глобальном соревновании? [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://forumspb.com/news/news/v-pogone-za-iskusstvennym-intellektom-ktopobedit-v-globalnom-sorevnovanii/>

Однако внедрение в бизнес-процессы искусственного интеллекта не может быть универсальным решением всех проблем. Эффективность и точность алгоритмов искусственного интеллекта во многом зависят от качества и объема данных, а также от контекста их использования [10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование алгоритмов искусственного интеллекта помогает обнаружить проблемные места в производственных процессах, анализируя данные о работе оборудования, производительности и затратах. Алгоритмы могут обнаруживать дефекты или несоответствия производственных процессов в режиме реального времени. Исправление выявленных дефектов повысит качество финальной продукции и минимизирует расходы.

Системы на основе машинного обучения помогают улучшить планирование и управление цепочками поставок на основе анализа информации о поставках, логистике и количестве товарных запасов. Это позволит анализировать затраты на сырье, трудозатраты и энергоресурсы для выявления возможностей для сокращения расходов и повышения рентабельности.

Алгоритмы машинного обучения помогут исследовать и анализировать рынки, определять потребительские тренды и выявлять возможности для разработки новых изделий, основываясь на предпочтениях потребителей.

Таким образом, использование машинного обучения в производстве открывает новые горизонты для повышения эффективности, улучшения качества и адаптивности процессов. Использование таких систем помогает компаниям реагировать на изменения рыночной среды, оптимизировать свои операции и поддерживать конкурентоспособность. В то время как технологии продолжают развиваться, роль машинного обучения в индустрии будет только возрастать.

Кроме того, любая система, если застывает в своем развитии, начинает отставать, деградировать. И в наше время, время сверхбыстрого развития информационных технологий способность системы соответствовать, адаптироваться к изменениям является ключевой.

В настоящее время практически все отрасли экономики и социальной сферы нуждаются в цифровых технологиях, которые позволят перевести бизнес-процессы в цифровую среду. Доля компаний, реализующих проекты цифровой трансформации, и объем инвестиций в реализацию таких проектов значительно увеличиваются, увеличивается и количество экспертов, а также развиваются их цифровые компетенции. Это внушает бизнесу позитивные надежды, связанные с повышением эффективности при использовании цифровых решений.

Для того чтобы компании, в том числе малые и средние предприятия, могли участвовать в цифровой трансформации, необходимо сократить разрыв между флагманами и отстающими.

Существуют значительные различия в масштабах и скорости внедрения цифровых технологий в различных секторах экономики. Снизить риск цифрового разрыва может помочь механизм поддержки в рамках национального проекта «Цифровая экономика Российской Федерации», который направлен на реализацию технологических приоритетов и внедрение цифровых технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Догучаева С. М.* Инновационное развитие искусственного интеллекта и машинного обучения в современной экономике // РИСК: Ресурсы, Информация, Снабжение, Конкуренция. 2019. № 1. С. 136–138. EDN: ROCRDW

2. Мурзагалина Г. М., Китабанов А. Опыт применения искусственного интеллекта в производстве для повышения производительности и безопасности персонала // Московский экономический журнал. 2022. Т. 7. № 12. С. 474–482. DOI: 10.55186/2413046X_2022_7_12_715
3. Положевец Е. В., Сыкеева И. Н. Из истории использования искусственного интеллекта // Вестник образовательного консорциума «Среднерусский университет». Информационные технологии. 2024. № 1(23). С. 52–54.
4. Стефанова Н. А., Сидорова Ю. В. Использование искусственного интеллекта для принятия управленческих решений // Вопросы устойчивого развития общества. 2020. № 2. С. 331–334. DOI: 10.34755/IROK.2020.45.31.021. EDN: INDGSX
5. Арзамасов Ю. Г. Комплексный подход к определению искусственного интеллекта // Вестник ВГУ. Серия: Право. 2022. № 3(50). С. 242–262.
6. Благовещенская М. М., Благовещенский И. Г., Назойкин Е. А., Крылова Л. А. Методика автоматической оценки качества пищевых изделий на основе теории искусственных нейронных сетей // Пищевая промышленность. 2015. № 2. С. 42–45. EDN: TKLVUN
7. Фроликов А. В., Трубин А. Е., Алексахин А. Н., Нечаев А. М. Перспективы и риски применения технологии искусственного интеллекта в корпоративном управлении // Вестник Российского экономического университета имени Г. В. Плеханова. 2025. Т. 22. № 1(139). С. 198–208. DOI: 10.21686/2413-2829-2025-1-198-208
8. Рылов С. А., Холопов В. А., Благовещенский И. Г., Назойкин Е. А. Цифровые двойники систем автоматизации на базе промышленного интернета вещей с применением технологий виртуализации // Приборы. 2022. № 11(269). С. 27–31. EDN: HMGVYA
9. Алексахин А. Н., Алыменко М. А., Анисимов А. Ю. и др. Прикладные аспекты применения искусственного интеллекта и нейросетевых технологий. М.: Общество с ограниченной ответственностью «Русайнс», 2024. 176 с. ISBN: 978-5-466-07072-9. EDN: DJPAKM
10. Анисимов А. Ю., Трубин А. Е., Алексахин А. Н. и др. Проблемы и перспективы внедрения информационных технологий в процесс подготовки кадров для цифровой экономики. М.: Общество с ограниченной ответственностью «Русайнс», 2023. 170 с. ISBN: 978-5-466-03248-2. EDN: XHZQNI
11. Габалин А. В., Гребенюк Г. Г., Дорри М. Х. и др. Модели и методы анализа устойчивости критической инфраструктуры с применением цифрового двойника // Сборник научных трудов XXV Российской научной конференции «Инжиниринг предприятий и управление знаниями». Т. 1. Москва, 2022. С. 70–77. EDN: GPLSSR
12. Звонов А. О., Захаров А. В. Использование нейронной сети для автоматизации проектирования типовых технических объектов. В сборнике: Информационные технологии в науке и производстве. Материалы IX Всероссийской молодежной научно-технической конференции. Омск, 2022. С. 116–121. EDN: OINXLZ
13. Потяг В. С. Применение искусственного интеллекта как инструмент повышения экономической эффективности промышленного предприятия. Сборник научных трудов «Теория и практика управления в современных условиях» по итогам III Международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 2024. С. 414–417. EDN: GZAQJI
14. Ребус Н. А. Проектирование и реализация компонентов интеллектуальной программной среды. В сборнике: Роль бизнеса в трансформации общества – 2023. Сборник материалов XVIII Международного конгресса (международной научно-практической конференции). М., 2023. С. 353–357. EDN: ZOEDLJ

15. Рылов С. А., Благовещенский И. Г., Кучумов А. В. и др. Архитектурная концепция разработки современных цифровых двойников на базе промышленного интернета вещей. Сборник научных докладов «Фабрика будущего: переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам для отраслей пищевой промышленности» III Международной специализированной конференции-выставки. Курск, 2022. С. 284–293.

REFERENCES

1. Doguchaeva S.M. Innovative development of artificial intelligence and machine learning in the modern economy. *RISK: Resursy, Informatsiya, Snabzheniye, Konkurentsia* [RISK: Resources, Information, Supply, Competition]. 2019. No. 1. Pp. 136–138. EDN: ROCRDW. (In Russian)
2. Murzagalina G.M., Kitabanov A. The experience of using artificial intelligence in production to increase productivity and staff safety. *Moskovskiy ekonomicheskij zhurnal* [Moscow Economic Journal]. 2022. Vol. 7. No. 12. Pp. 474–482. DOI: 10.55186/2413046X_2022_7_12_715. (In Russian)
3. Polozhevets E.V., Sykeeva I.N. From the history of the use of artificial intelligence. *Vestnik obrazovatel'nogo konsortsiума "Srednerusskiy universitet". Informatsionnyye tekhnologii* [Bulletin of the educational consortium Central Russian University. Information technology]. 2024. No. 1(23). Pp. 52–54. (In Russian)
4. Stefanova N.A., Sidorova Yu.V. The use of artificial intelligence for managerial decision-making. *Voprosy ustoychivogo razvitiya obshchestva* [Issues of sustainable development of society]. 2020. No. 2. Pp. 331–334. DOI: 10.34755/IROK.2020.45.31.021. EDN: INDGSX. (In Russian)
5. Arzamasov Yu.G. An integrated approach to the definition of artificial intelligence *Vestnik VGU* [Bulletin of the VSU]. Series: Law. 2022. No. 3(50). Pp. 242–262. (In Russian)
6. Blagoveshchenskaya M.M., Blagoveshchensky I.G., Nazoikin E.A., Krylova L.A. Method of automatic assessment of the quality of food products based on the theory of artificial neural networks. *The food industry*. 2015. No. 2. Pp. 42–45. EDN: TKLVUN. (In Russian)
7. Frolikov A.V., Trubin A.E., Aleksakhin A.N., Nechaev A.M. Prospects and risks of using artificial intelligence technology in corporate governance. *Vestnik Rossiyskogo ekonomicheskogo universiteta imeni G.V. Plekhanova* [Bulletin of the Plekhanov Russian University of Economics]. 2025. Vol. 22. No. 1(139). Pp. 198–208. DOI: 10.21686/2413-2829-2025-1-198-208. (In Russian)
8. Rylov S.A., Kholopov V.A., Blagoveshchenskiy I.G., Nazoikin E.A. Digital twins of automation systems based on the industrial Internet of Things using virtualization technologies. *Instrumentation*. 2022. No. 11(269). Pp. 27–31. EDN: HMVGYA. (In Russian)
9. Aleksakhin A.N., Alymenko M.A., Anisimov A.Yu. et al. *Prikladnyye aspekty primeneniya iskusstvennogo intellekta i neyrosetevykh tekhnologiy* [Applied aspects of artificial intelligence and neural network technologies]. Moscow: Obshchestvo s ogranichennoy otvetstvennost'yu "Rusayns", 2024. 176 p. ISBN: 978-5-466-07072-9. EDN: DJPAKM. (In Russian)
10. Anisimov A.Yu., Trubin A.E., Aleksakhin A.N. et al. *Problemy i perspektivy vnedreniya informatsionnykh tekhnologiy v protsess podgotovki kadrov dlya tsifrovoy ekonomiki* [Problems and prospects of introducing information technologies into the process of personnel training for the digital economy]. Moscow: Obshchestvo s ogranichennoy otvetstvennost'yu "Rusayns", 2023. 170 p. ISBN: 978-5-466-03248-2. EDN: XHZQNI. (In Russian)
11. Gabalin A.V., Grebenyuk G.G., Dorri M.Kh. et al. *Modeli i metody analiza ustoychivosti kriticheskoy infrastruktury s primeneniym tsifrovogo dvoynika* [Models and methods for

analyzing the stability of critical infrastructure using a digital twin]. Sbornik nauchnykh trudov XXV Rossiyskoy nauchnoy konferentsii “Inzhiniring predpriyatiy i upravleniye znaniyami”. Vol. 1. Moscow, 2022. Pp. 70–77. EDN: GPLSSR. (In Russian)

12. Zvonov A.O., Zakharov A.V. *Ispol'zovaniye neyronnoy seti dlya avtomatizatsii proyektirovaniya tipovykh tekhnicheskikh ob'yektov* [Using a neural network to automate the design of typical technical facilities]. V sbornike: *Informatsionnyye tekhnologii v nauke i proizvodstve* [Information technologies in science and production]. Materialy IX Vserossiyskoy molodezhnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Omsk, 2022. Pp. 116–121. EDN: OINXLZ. (In Russian)

13. Potyag V.S. *Primeneniye iskusstvennogo intellekta kak instrument povysheniya ekonomicheskoy effektivnosti promyshlennogo predpriyatiya* [The use of artificial intelligence as a tool to increase the economic efficiency of an industrial enterprise]. Sbornik nauchnykh trudov “Teoriya i praktika upravleniya v sovremennykh usloviyakh” po itogam III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. St. Petersburg, 2024. Pp. 414–417. EDN: GZAQJI. (In Russian)

14. Rebus N.A. *Proyektirovaniye i realizatsiya komponentov intellektual'noy programmnoy sredy* [Design and implementation of components of an intelligent software environment]. V sbornike: *Rol' biznesa v transformatsii obshchestva – 2023* [The role of business in the transformation of society – 2023]. Sbornik materialov XVIII Mezhdunarodnogo kongressa (mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii). Moscow, 2023. Pp. 353–357. EDN: ZOEDLJ. (In Russian)

15. Rylov S.A., Blagoveshchenskiy I.G., Kuchumov A.V. et al. *Arkhiturnaya kontseptsiya razrabotki sovremennykh tsifrovyykh dvoynikov na baze promyshlennogo interneta veshchey* [An architectural concept for the development of modern digital twins based on the industrial Internet of Things]. Sbornik nauchnykh dokladov “Fabrika budushchego: perekhod k peredovym tsifrovym, intellektual'nym proizvodstvennym tekhnologiyam, robotizirovannym sistemam dlya otrasley pishchevoy promyshlennosti” III Mezhdunarodnoy spetsializirovannoy konferentsii-vystavki. Kursk, 2022. Pp. 284–293. (In Russian)

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Информация об авторах

Ребус Наталья Анатольевна, доцент кафедры цифровой экономики, Московский финансово-промышленный университет «Синергия»;

125315, Россия, Москва, Ленинградский проспект, 80, корп. Е;

Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ);

125080, Россия, Москва, Волоколамское шоссе, 11, корп. А;

nrebus@synergy.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3086-4200>, SPIN-код: 6143-4370

Благовещенский Иван Германович, д-р техн. наук, профессор кафедры информатики и вычислительной техники пищевых производств, Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ);

125080, Россия, Москва, Волоколамское шоссе, 11, корп. А;

drbl@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7862-680X>, SPIN-код: 7057-5071

Ратанова Ольга Валентиновна, доцент кафедры цифровой экономики, Московский финансово-промышленный университет «Синергия»;

125315, Россия, Москва, Ленинградский проспект, 80, корп. Е;

rov75@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9870-4636>, SPIN-код: 8543-6319

Мастяев Филипп Алексеевич, старший преподаватель кафедры цифровой экономики, Московский финансово-промышленный университет «Синергия»;

125315, Россия, Москва, Ленинградский проспект, 80, корп. Е;

raven128@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8012-8594>, SPIN-код: 5209-2449

Information about the authors

Natalia A. Rebus, Associate Professor of the Department of Digital Economics, Moscow Financial and Industrial University “Synergy”;

125315, Russia, Moscow, 80 Leningradsky avenue, building E;

Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH);

125080, Russia, Moscow, 11 Volokolamsk shosse, building A;

nrebus@synergy.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3086-4200>, SPIN-code: 6143-4370

Ivan G. Blagoveshchenskiy, Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Computer Science and Computer Technology of Food Production, Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH);

125080, Russia, Moscow, 11 Volokolamsk shosse, building A;

drbl@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7862-680X>, SPIN-code: 7057-5071

Olga V. Ratanova, Associate Professor of the Department of Digital Economics, Moscow Financial and Industrial University “Synergy”;

125315, Russia, Moscow, 80 Leningradsky avenue, building E;

rov75@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9870-4636>, SPIN-code: 8543-6319

Filipp A. Mastyaev, Senior Teacher of the Department of Digital Economics, Moscow Financial and Industrial University “Synergy”;

125315, Russia, Moscow, 80 Leningradsky avenue, building E;

raven128@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8012-8594>, SPIN-code: 5209-2449

===== АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ =====
И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 004.891+007.52+681.518

Научная статья

DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-2-55-73

EDN: LELPHS

**Применение миварных экспертных систем
для диагностики бактериальной устойчивости к антибиотикам**

Н. Ч. Салахутдинова¹, О. О. Варламов^{✉1, 2, 3}

¹Институт искусственного интеллекта Российского технологического университета МИРЭА
119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, 78

²Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана
105005, Россия, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, корп. 1

³АО НИИ вычислительных комплексов имени М. А. Карцева
117437, Россия, Москва, ул. Профсоюзная, 108

Аннотация. Исследование посвящено использованию миварных экспертных систем для выявления бактериальной устойчивости к существующим антибиотикам. Представлена модульная архитектура системы, которая позволяет легко добавлять и обновлять отдельные компоненты. Создана миварная база знаний, состоящая из 56 правил для работы с экспертной системой. Предлагается реализовать систему с использованием программного обеспечения (ПО) КЭСМИ, которое позволило получать логический вывод решения. Система протестирована на трех различных случаях. Первый случай включал наличие мутации в гене *tesA*, второй – метилированные рибосомы, а третий – грамположительные бактерии. Тестирование миварной экспертной системы показало, что результаты устойчивости бактерий соответствовали установленной базе знаний. Изучено влияние использования миварных экспертных систем на процесс выявления антибиотикорезистентности. Предложено описание методологий, использованных для оценки эффективности системы. Обосновано, почему использование миварных экспертных систем может значительно улучшить диагностику и лечение инфекционных заболеваний.

Ключевые слова: мивар, миварная экспертная система, КЭСМИ, Большие Знания, бактериальная устойчивость, автоматизированные системы управления производствами, умные производственные системы, автоматизированные системы управления технологическими процессами

Поступила 18.03.2025, одобрена после рецензирования 26.03.2025, принята к публикации 03.04.2025

Для цитирования. Салахутдинова Н. Ч., Варламов О. О. Применение миварных экспертных систем для диагностики бактериальной устойчивости к антибиотикам // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2025. Т. 27. № 2. С. 55–73. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-2-55-73

MSC: 68T35, 90B50

Original article

**The use of mivar expert systems for diagnosis
of bacterial antibiotic resistance**

N.Ch. Salakhutdinova¹, O.O. Varlamov^{✉1, 2, 3}

¹Institute of Artificial Intelligence of the Russian Technological University MIREA
119454, Russia, Moscow, 78 Vernadsky avenue

²Moscow State Technical University named after N.E. Bauman
105005, Russia, Moscow, corp. 1, building 5, 2nd Baumanskaya street

³JSC M.A. Kartsev Research Institute of Computing Systems
117437, Russia, Moscow, 108 Profsoyuznaya street

Abstract. The study is dedicated to the use of mivar expert systems for identifying bacterial resistance to existing antibiotics. A modular architecture of the system was presented, which allows easy addition and updating of individual components. A knowledge base consisting of 56 rules for working with the expert system was created. It is proposed to implement the system using the KESMI software, which allowed for logical conclusions to be drawn. The system was tested on three different cases. The first case involved the presence of a mutation in the *mecA* gene, the second involved methylated ribosomes, and the third involved Gram-positive bacteria. Testing of the Mivar expert system showed that the bacteria's resistance results matched the established knowledge base. The impact of using Mivar expert systems on the process of detecting antibiotic resistance has been studied. A description of the methodologies used to evaluate the system's effectiveness was proposed. It was justified why the use of expert systems can significantly improve the diagnosis and treatment of infectious diseases.

Keywords: mivar, mivar expert system, Wi!Mi, Big Knowledge, bacterial antibiotic resistance, automated production control systems, smart production systems, automated process control systems

Submitted 18.03.2025,

approved after reviewing 26.03.2025,

accepted for publication 03.04.2025

For citation. Salakhutdinova N.Ch., Varlamov O.O. The use of mivar expert systems for diagnosis of bacterial antibiotic resistance. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2025. Vol. 27. No. 2. Pp. 55–73. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-2-55-73

ВВЕДЕНИЕ

Бактериальная устойчивость к антибиотикам является одной из серьезных угроз для глобального здравоохранения. С каждым годом патогены становятся более устойчивыми к существующим антибиотикам, что приводит к усложнению лечения инфекционных заболеваний и увеличению числа летальных случаев. Одним из ключевых решений данной проблемы является создание новых препаратов. Однако процесс разработки антибиотиков требует значительных ресурсов. В этом случае использование искусственного интеллекта (ИИ) и систем поддержки принятия решений (СППР) становится особенно актуальным. Существуют различные логические модели искусственного интеллекта, которые обладают своими преимуществами и недостатками [1]. Так, логика первого порядка дает возможность описания знаний об атрибутах объектов и их взаимосвязях, что делает ее подходящей для экспертных систем. Однако высокая вычислительная сложность и трудности в формализации знаний могут стать препятствиями для внедрения системы, основанной на такой модели логики. Многозначная логика учитывает неопределенность, расширяя область логического вывода, однако трудности в интерпретации результатов могут усложнить систему. Неопределенная логика позволяет работать с противоречивой информацией и строить гибкие системы искусственного интеллекта, но ее формализация и вычислительные методы могут быть сложными.

В то же время в области искусственного интеллекта продолжают исследования, направленные на разработку миварных технологий логического искусственного интеллекта (ЛИИ) [1].

Эти технологии используются во многих областях науки и техники. Исследования этических аспектов ИИ включали применение миварных технологий для скоринга кредитования [2]. Были рассмотрены логические, философские и этические аспекты применения ИИ в медицине [3], на основе миварных технологий представлено программное обеспечение для поддержки принятия решений в области безопасности термолабильных компонентов крови [4] и для обнаружения падений людей, что имеет важное значение для качества жизни [5]. Кроме того, миварные системы были применены в области распределенных реестров, где предлагалось решение для выбора алгоритма консенсуса [6], также разработаны

системы динамического планирования траектории роботов, что значительно улучшило их работу [7]. В области 3D-моделирования активно развиваются миварные технологии для создания 3D-объектов [8].

С 1985 года миварные технологии развиваются и охватывают различные направления искусственного интеллекта [10], способствуя прогрессу всего человечества [11, 12]. Миварные технологии активно развиваются в области сетевых систем. В частности, исследования касаются создания миварных баз знаний для кластера НИИР для распараллеливания алгоритмов [13], подбора рекламных кампаний на основе сравнения многомерных векторов [14].

В медицинской сфере миварные технологии были задействованы для автоматизации исследований открытого артериального протока и слуха [15], а также для индивидуального контроля функций внешнего дыхания [16] и подбора полезных продуктов [17].

Обработка данных также является важной сферой. Так, миварные системы использовались для сегментации деревьев по анализу облаков точек [18]. Также они нашли применение в создании миварных баз знаний с использованием облачных технологий [19], больших лингвистических моделей [20], а также в смысловой обработке текстовых данных, что позволило работать с большими объемами информации более эффективно [21].

В сфере автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) миварные технологии использовались для моделирования систем в виде двудольных и трехдольных графов [22] и поддержки принятия решений по категоризации критической информационной инфраструктуры [23]. Также они были применены для оптимизации вычислений на процессорах «Эльбрус» [24], в технической поддержке высоконагруженных кластеров [25], для улучшения безопасности и аналитики данных в локальных сетях, для категоризирования критической информации инфраструктуры в АСУТП [26, 27].

В робототехнике и автономных системах миварные технологии улучшили функциональность роботов [28], в сельском хозяйстве были использованы для проектирования автономных комбайнов и тракторов для оптимизации сельскохозяйственных процессов [29], а также в контроле микроклимата в оранжереях, что способствовало улучшению условий для роста растений [30]. Использование LLM (Large Language Model) для создания баз знаний о культурах улучшило агротехнологии [31], а система для цифрового сельского хозяйства повысила продуктивность [33]. Создание «Логической интеллектуальной системы ухода за растениями» на основе подхода МИВАР открывает новые горизонты для оптимизации агрономических процессов [34]. В другой работе предлагается новый метод создания баз знаний МИВАР в таблично-матричной форме, что может значительно улучшить управление наземными интеллектуальными транспортными средствами [35]. Методы планирования для систем управления транспортными средствами и роботами с использованием подхода MIPRA также развиваются в рамках исследований [36].

Таким образом, исследование применения технологий ИИ для умных производственных систем в производстве является целесообразным в контексте создания Больших Знаний [9] и расширения областей внедрения миварных технологий ИИ [32]. Следовательно, данная тема работы актуальна и имеет значительное практическое значение.

АНАЛИЗ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

Диагностика бактериальной устойчивости к антибиотикам представляет собой сложный и многоэтапный процесс, включающий несколько ключевых шагов. Рассмотрим каждый этап отдельно.

Первый этап – это сбор образцов, которые могут содержать те или иные бактерии. Качество этих образцов играет важную роль, поскольку оно напрямую влияет на точность

дальнейших исследований. После образцы помещаются в питательные среды, созданные для роста колоний.

На следующем этапе проводится идентификация бактерий. Для этого применяются различные методы. Это могут быть традиционные микроскопические и биохимические тесты, которые помогают визуально наблюдать бактерии и выявлять химические свойства соответственно. Современные молекулярные методы, такие как ПЦР (полимеразная цепная реакция), позволяют идентифицировать специфические изменения в ДНК бактерий, что значительно повышает точность диагностики.

Следующий этап связан с тестированием чувствительности бактерий к антибиотикам. Для этого применяются такие методы, как дискодиффузионный (метод Кирби-Бауэра) и метод разбавлений. Эти методы позволяют точно оценить эффективность антибиотика в подавлении роста бактерий. На основе полученных данных определяется, какие антибиотики будут наиболее эффективными в лечении. Помимо этого, важно учитывать возможные генетические мутации и механизмы устойчивости, которые могут быть выявлены на данном этапе. Иногда требуется повторное тестирование. Это позволяет корректировать применение тех или иных антибиотиков в зависимости от изменений.

Этап интерпретации результатов также важен в процессе диагностики бактериальной устойчивости. На этом этапе анализируются данные о патогенах и их реакциях на антибиотики, определяется их чувствительность или устойчивость. Внедрение современных технологий в этот процесс значительно улучшает диагностику, что в свою очередь ведет к лучшим клиническим результатам.

Системный подход к интеграции инновационных технологий будет основным фактором, способствующим успешной борьбе с бактериальной устойчивостью. Несмотря на значительные успехи в этих областях, существует ряд проблем, которые замедляют этот процесс. Одной из основных проблем является широкое распространение устойчивости бактерий к антибиотикам. Основные причины этого заключаются в нерациональном использовании антибиотиков в медицине, а также в генетических мутациях бактерий и их способности быстро адаптироваться. Хотя интеллектуальные системы могут помочь в предсказании устойчивости, важно учитывать, что бактерии могут мутировать. Другой проблемой является медленный процесс разработки новых антибиотиков. Это длительный процесс, поскольку клинические испытания требуют затрат времени. Причины этого состоят в том, что при разработке имеются риски, связанные с возможным негативным воздействием на здоровье человека. Использование интеллектуальных систем может значительно ускорить процесс создания новых препаратов. Таким образом, для повышения эффективности и ускорения этих процессов необходимо преодолеть ряд вызовов.

В рамках данной статьи рассматриваются методы применения миварных экспертных систем для диагностики бактериальной устойчивости к существующим антибиотикам.

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ СИСТЕМ

В сфере разработки антибиотиков интеллектуальные системы играют значительную роль, особенно в таких аспектах, как прогнозирование бактериальной устойчивости, обнаружение новых антибиотиков и оптимизация производственных процессов. В последние годы растет практическое применение нейронных сетей. Тем не менее, выбор между нейронными сетями и экспертными системами зависит от специфики самой задачи. В статье «Artificial Intelligence for Antimicrobial Resistance Prediction: Challenges and Opportunities

towards Practical Implementation» [37] рассмотрены современные достижения в области искусственного интеллекта для решения проблем и использования возможностей, связанных с антибиотикорезистентностью. Представлен обзор современных вызовов и возможностей. К ним относятся входные характеристики, создающие проблемы при использовании, современные модели глубокого/машинного обучения для надежности и высокой точности, а также вызовы и перспективы применения этих технологий для практических целей. Статья завершается призывом к применению ИИ в секторе антимикробная резистентность (АМР) с целью практической диагностики и лечения, поскольку в настоящее время большинство исследований находятся на ранних стадиях с минимальным применением в практике диагностики и лечения заболеваний.

Исследование Руи Тана и др. [38] подчеркивает важность машинного обучения в прогнозировании АМР. Наиболее часто используемыми алгоритмами в предсказании с помощью машинного обучения были логистическая регрессия ($n = 14$ исследований), деревья решений ($n = 14$) и случайные леса ($n = 7$). Диапазон AUC (Area Under the Curve) для предсказаний с использованием машинного обучения составил 0,48–0,93. Полученные результаты свидетельствуют о том, что машинное обучение может быть полезной технологией для прогнозирования АМР; однако ретроспективная методология разработки моделей, нестандартная обработка данных и отсутствие валидации в рандомизированном контролируемом исследовании или исследовании в реальных условиях ограничивают использование этих моделей в клинической практике.

Обзор Хазрата Билала и др. синтезирует потенциальную роль искусственного интеллекта и машинного обучения (ИИ/МО) в минимизации АМР. Они исследуют различные применения ИИ и МО в борьбе с АМР, подчеркивая важность интегрированных подходов, учитывающих множество аспектов [39].

Сьёрд де Врис и др. обнаружили, что комбинация результатов анализа мочи, окраски по Граму и других доступных критериев может успешно предсказать инфекцию мочевыводящих путей (ИМП) [40]. На основе собранной информации они разработали систему поддержки клинических решений (CDSS), использующую надежный метод полуконтролируемого ансамблевого обучения (RESSEL), который оказался более точным, чем анализ мочи и посев мочи для предсказания ИППП (инфекций, передающихся половым путем). CDSS предоставляет клиницистам этот прогноз в течение нескольких часов после заказа анализа, что позволяет им избежать преждевременного назначения антибиотиков при инфекциях мочевыводящих путей, ожидая результатов анализа.

Кроме того, Мариам Форуги и др. исследуют роль машинного обучения в мониторинге антибиотикорезистентности в воде и сточных водах, освещая экологический аспект АМР [41]. Их исследование подчеркивает важность отслеживания устойчивости в различных экосистемах, поскольку системы водоснабжения и сточных вод могут служить резервуарами для устойчивых патогенов, которые влияют как на здоровье человека, так и на окружающую среду.

Таким образом, происходит активное внедрение методов искусственного интеллекта и систем поддержки принятия решений в сферу диагностики антибиотикорезистентности.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Разработка системы для диагностики бактериальной устойчивости и прогнозирования новых антибиотиков на основе интеллектуальных технологий требует учета множества факторов, чтобы она была точной, эффективной и применимой в реальной практике в медицине и фармацевтике.

Первое, на что стоит обратить внимание, – это функциональные требования. Система должна уметь определять устойчивость бактерий к существующим антибиотикам, используя генетические данные, информацию о взаимодействиях с лекарствами и учитывая влияние внешней среды. Также важно, чтобы система могла предсказать распространение устойчивых штаммов в разных регионах и как различные методы лечения могут повлиять на этот процесс.

Нефункциональные требования также играют важную роль. Система должна обеспечивать точность прогнозирования бактериальной устойчивости на основе входных данных.

Технические требования включают поддержку различных алгоритмов. Система должна поддерживать разные алгоритмы, а также иметь возможность адаптироваться, когда появляются новые данные о бактериях и антибиотиках. Важно, чтобы система могла эффективно обрабатывать большие объемы данных.

Таким образом, создание системы на основе интеллектуальной системы для диагностики бактериальной устойчивости и прогнозирования новых антибиотиков требует комплексного подхода, учитывающего функциональные, нефункциональные и технические требования. Для создания миварной экспертной системы (МЭС) необходимо провести разноплановую научную и практическую работу, причем силами людей разных специальностей, которые должны быть объединены в коллектив. Перейдем к решению нашей задачи создания МЭС.

МОДЕЛЬ ОПИСАНИЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ, ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ И ИИ В ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ В ФОРМАЛИЗМЕ МИВАРНЫХ СЕТЕЙ

МЭС обладают рядом характеристик, которые делают их ценными в различных областях. Они имеют модульную архитектуру, что позволяет легко добавлять, обновлять или заменять отдельные модули без необходимости переписывать всю систему, обеспечивая гибкость в адаптации к новым данным. МЭС также могут включать специализированные модули для различных аспектов диагностики и предсказания устойчивости, таких как анализ генетических данных, клинических испытаний и взаимодействий с антибиотиками. Например, они могут объединять данные о бактериальной устойчивости, клинические данные и генетическую информацию.

Перейдем к разработке модели системы с помощью ПО КЭСМИ. Программа обеспечивает создание и редактирование качественных моделей ситуаций и предметных областей, а также выполняет структурный анализ моделей, позволяя получать логический вывод решения и объяснять его в виде последовательности выполненных действий. КЭСМИ имеет модульную структуру, что позволяет добавлять новые компоненты.

Были созданы предварительные классы и параметры системы для дальнейшей разработки отношений и правил (рис. 1). Класс *Geodraphic_resistance* создан для прогнозирования устойчивости микроорганизмов в зависимости от тех или иных географических особенностей в связи с тем, что методики лечения в разных странах могут отличаться. Далее создан класс *Microbiological_examination* для решения задачи прогнозирования по химической и физической структуре микроорганизма. Также создан класс *Mutation* для предоставления прогнозирования резистентности в зависимости от тех или иных генетических мутаций. Для каждого класса были созданы отношения с правилами (рис. 2, 3).

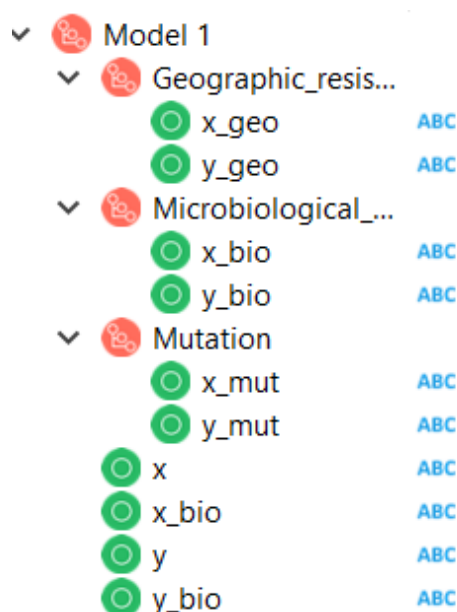


Рис. 1. Часть созданных классов и параметров системы

Fig. 1. Part of the created classes and system parameters

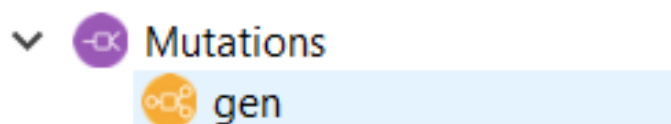


Рис. 2. Отношение “Mutation” с правилом “gen” (пример)

Fig. 2. The “Mutation” relation with the “gen” rule (example)

Редактор

```
var x_mut, y_mut;

if (x_mut=="bla+"){
```

Входные параметры

Добавить Удалить

	Наименование	Тип
1	x_mut	Текст

Выходные параметры

Добавить Удалить

	Наименование	Тип
1	y_mut	Текст

Рис. 3. Правило “gen” с прописанным сложным условным выражением

Fig. 3. The “gen” rule with a complex conditional expression written in it

Правила разрабатывались на основе ранее созданной базы знаний. Такой подход позволил учесть различные аспекты. Кроме того, использование уже существующей базы знаний позволило избежать дублирования усилий и сосредоточиться на актуальных вопросах, требующих решения. Пример правил показан в таблице 1.

Таблица 1. Пример правил базы знаний (фрагмент)

Table 1. Example of knowledge base rules (fragment)

№	Если	То
1	Если микроорганизм имеет мутации в генах bla и mecA,	То антибиотик, который неэффективен, – бета-лактамы
2	Если микроорганизм имеет механизмы, позволяющие ему модифицировать антибиотики (например, метилирование рибосом),	То это может привести к устойчивости к макролидам и аминогликозидам
3	Если микроорганизм имеет мутацию в гене, связанном с метициллиновой резистентностью (например, ген mecA),	То антибиотик, который может быть менее эффективен, – метициллин
4	Если микроорганизм имеет измененные порины,	То это может снизить проницаемость для β-лактамов
5	Если структура клеточной стенки микроорганизма содержит специфические белки (например, PBP2a у Staphylococcus aureus),	То это может влиять на его чувствительность к метициллину и другим β-лактамам
6	Если микроорганизм образует биопленку,	То потребуется использование препаратов, способных разрушать биопленку (например, ферменты или комбинации антибиотиков) с вероятностью эффективности 80–95%
7	Если микроорганизм грамположителен, а молекулярная структура антибиотика имеет сходство с производными пенициллина,	То вероятность устойчивости составляет 60–85 %
8	Если микроорганизм имеет механизмы активного выведения антибиотиков (например, через эффлюксные насосы),	То это может привести к устойчивости к множеству антибиотиков, включая тетрациклины и макролиды
9	Если микроорганизм не имеет мутаций в генах, связанных с устойчивостью к линезолиду,	То антибиотик, который эффективен, – линезолид.
10	Если микроорганизм подвергается длительному воздействию антибиотиков из одного класса антибиотиков (например, бета-лактамов),	То устойчивость к этому классу повышается до 70–90 %

Также выполним реализацию миварной экспертной системы в ПО КЭСМИ. Приведем фрагмент формальной реализации миварной экспертной системы (приложение 1).

Приложение 1. Реализация миварной экспертной системы

Application 1. Implementation of the mivar expert system

```

<model id="{7e561505-fe5f-4dc5-874a-80ab05eb909c}" short-
Name="Model 1" formatXmlVersion="2.0" description="Model 1">
  <class id="{bce4821c-bc09-4972-84ea-7cb416158a2e}" short-
Name="Model 1">
    <parameters>
      ...
    </parameters>
  </class>
</model>

```

```

    <rules>
      <rule id="685b03ac-f0da-446e-b374-2264bbfbfb2"
shortName="An" relation="2c55241f-ec47-4deb-a5f1-5803a8d13d31"
resultId="y:93c20c97-c1f0-4a07-9437-c9b972122a04" ini-
tId="x:dc8387de-4574-4182-b259-6caef80c40c8"/>
      <rule id="fc976684-4a6d-4ac7-95d9-7d561cd3f7de"
shortName="Ch" relation="d4894089-7706-4a10-a8fb-90036f90b067"
resultId="y:93c20c97-c1f0-4a07-9437-c9b972122a04" ini-
tId="x:dc8387de-4574-4182-b259-6caef80c40c8"/>
    </rules>
    <constraints/>
    <classes>
      <class id="2bfdf5ff-581a-44fa-b50f-ab45c876caf4"
shortName="Geographic_resistance">
        <parameters>
          <parameter id="3b9bb702-26e4-402e-93ce-
f8668b29b4b1" shortName="x_geo" type="string"/>
          <parameter id="5f53b0e5-051b-4f3b-ad46-
74d46082eb72" shortName="y_geo" type="string"/>
        </parameters>
        <rules/>
        <constraints/>
        <classes/>
      </class>
      <class id="594a37f9-9f8c-4142-b478-d90b45f2d82c"
shortName="Mutation">
        <parameters>
          <parameter id="957aa9d8-ed1a-4fd4-84b2-
d06fc07962a2" shortName="y_mut" type="string"/>
          <parameter id="ea90a28b-2bb9-4c54-9053-
dba0b371af95" shortName="x_mut" defaultValue="-"
type="string"/>
        </parameters>
        <rules>
          <rule id="f2674ad3-1454-4d6e-8026-
eaf26ab67282" shortName="gen" relation="97cbcf14-ac35-4fbd-
b8a8-38eb5cf028ae" resultId="y_mut:957aa9d8-ed1a-4fd4-84b2-
d06fc07962a2" initId="x_mut:ea90a28b-2bb9-4c54-9053-
dba0b371af95"/>
        </rules>
        <constraints/>
        <classes/>
      </class>
      <class id="f5b76d0c-1335-48ab-9131-91dc3a21a78c"
shortName="Microbiological_examination">
        <parameters>
          <parameter id="191572e9-dae8-4b87-aa58-

```

```

3d0dd2da0f07" shortName="y_bio" type="string"/>
    <parameter id="d9994431-800d-419e-b6c9-
a3f296de52bb" shortName="x_bio" type="string"/>
  </parameters>
  <rules>
    <rule id="0ccca8bd-b6e6-4d96-a26b-
534394210e53" shortName="Exns" relation="fb581a17-382c-48b3-
8634-02feadcaa134" resultId="y_bio:191572e9-dae8-4b87-aa58-
3d0dd2da0f07" initId="x_bio:d9994431-800d-419e-b6c9-
a3f296de52bb"/>
  </rules>
  <constraints/>
  <classes/>
</class>
</classes>
</class>
<relations>
  <relation id="2c55241f-ec47-4deb-a5f1-5803a8d13d31"
shortName="Anaerobic" inObj="x:string" relationType="ifclause"
outObj="y:string">if (x=="анаэробный")
{y="устойчивость_к_тетрациклинам";} else
{y="можно_использовать_тетрациклины";}</relation>
  <relation id="97cbcf14-ac35-4fbd-b8a8-38eb5cf028ae"
shortName="Mutations" inObj="x_mut:string" relationType="prog"
outObj="y_mut:string">var x_mut, y_mut; if (x_mut=="bla+"){
y_mut="есть_вероятность_устойчивости_к_бета-лактамам";} if
(x_mut= "erm+"){
y_mut="есть_вероятность_устойчивости_к_эритромицину";} if
(x_mut= "mecA+"){
y_mut="есть_вероятность_устойчивости_к_метициллину и бета-лак-
там";} </relation>
  <relation id="cb979c54-6577-44c7-9726-630946f2688d"
shortName="Geographic_resistances" inObj="x_geo:string" rela-
tionType="prog" outObj="y_geo:string">var x_geo, y_geo; if(
(x_geo=="в_регионе_высокая_частота_устойчивости_Streptococ-
cus_pneu-
moniae_к_пенициллину"))||(x_geo=="высокая_частота_устойчивости_S
treptococcus_pneumoniae_к_пенициллину")){
y_geo="следует_использовать_другие_антибиотики_такие_как_амокси-
циллин_с_клавулановой_кислотой";} if(
(x_geo=="в_регионе_увеличилась_частота_устойчивости_Pseudomo-
nas_aeru-
ginosa_к_фторхинолонам"))||(x_geo=="увеличилась_частота_устойчив-
ости_Pseudomonas_aeruginosa_к_фторхинолонам")){
y_geo="следует_использовать_аминогликозиды_или_карбапенемы";}
}</relation>
  <relation id="d4894089-7706-4a10-a8fb-90036f90b067"

```

```

shortName="Check" inObj="x:string" relationType="ifclause" outObj="y:string">if (x=="gram+") {y="устойчив_к_метициллину";} else {y="устойчив_к_ампициллину";}</relation>
    <relation id="fb581a17-382c-48b3-8634-02feadca134" shortName="Microbiological_examinations" inObj="x_bio:string" relationType="prog" outObj="y_bio:string">var x_bio,y_bio; if (x_bio=="модифицированные_рибосомы"){ y_bio="устойчивость_к_антибиотикам_нарушающим_синтез_белка_(аминогликозиды_и_макролиды)" } if (x_bio=="чувствительность_к_карбапенемам"){ y_bio="наличие_генов_устойчивости_к_карбапенемам" } </relation>
    </relations>
</model>

```

ПРОВЕДЕНИЕ ТЕСТИРОВАНИЯ МИВАРНОЙ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ

В связи с ограниченным объемом публикации покажем только один пример такого тестирования из всех проведенных.

Тест: Анализ образца, содержащего мутацию гена *mecA*.

Эта мутация является ключевым маркером, указывающим на потенциальную устойчивость к определенным классам антибиотиков. Мутация в гене *mecA* ассоциирована с резистентностью к метициллину, который является представителем класса бета-лактамов антибиотиков. Это означает, что микроорганизмы с данной мутацией способны вырабатывать белок, который нарушает действие антибиотиков, препятствуя их связыванию с целевыми мишенями в клеточной стенке бактерий.

Для анализа устойчивости мы будем использовать разработанную базу знаний, которая содержит информацию о различных патогенах и их реакциях на антибиотики. В частности, в нашей базе знаний реализовано правило, обозначенное как «правило 1+3». Это правило подразумевает, что наличие мутации *mecA* (правило 1) в сочетании с другими факторами (правило 3) указывает на устойчивость к метициллину и другим бета-лактамам антибиотикам (рис. 4, 5).

▼ Mutation		
x_mut	mecA+	☐
y_mut	есть вероятность устойчивости к метициллину и бета-лактамам	☒

Рис. 4. Результат / Fig. 4. Result

```

if (x_mut= "mecA+"){
    y_mut="есть вероятность устойчивости к метициллину и бета-лактамам";
}
Результат: y_mut=есть вероятность устойчивости к метициллину и бета-лактамам;

```

Рис. 5. Результат / Fig. 5. Result

На втором этапе тестирования мы будем анализировать микроорганизм с метилированными рибосомами. Для анализа устойчивости мы снова обратимся к разработанной базе знаний, в которой реализовано правило 2. Это правило гласит, что наличие метилированных рибосом в микроорганизме указывает на его устойчивость к макролидам и аминогликозидам. Это именно тот ответ, который выдаст система.

В третьем тестировании было установлено, что микроорганизм является грамположительным. Согласно установленным правилам, в частности правилу 7, можно сделать вывод, что этот микроорганизм проявляет устойчивость к пенициллину. Это связано с тем, что грамположительные микроорганизмы, особенно такие как стафилококки, могут вырабатывать бета-лактамазу или иметь другие механизмы, которые позволяют им сопротивляться действию пенициллина, что делает лечение инфекций, вызванных этими микроорганизмами, более сложным и требующим использования альтернативных антибиотиков.

Таким образом, миварная экспертная система продемонстрировала свою эффективность, выдавая правильные выводы в различных ситуациях. Это демонстрирует не только высокий уровень точности системы, но и ее универсальность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наше исследование в области умных производственных систем продемонстрировало, что создание миварной экспертной системы является не только возможным, но и целесообразным шагом для повышения уровня интеллектуализации процессов принятия решений и обработки информации.

В ходе реализации проекта была проведена комплексная работа, включающая системный анализ предметной области. Мы создали миварную базу знаний, которая включает 56 правил, описывающих процессы принятия решений и обработки информации. Также был обоснован выбор методов и алгоритмов, что позволило эффективно решать задачи в данной области. Была реализована миварная экспертная система, проведенное тестирование подтвердило работоспособность миварных моделей в контексте умных производственных систем.

Эволюционное развитие созданной миварной экспертной системы обеспечивается ее способностью к адаптации: в любой момент можно добавлять, изменять или удалять правила. Это было подтверждено в процессе работы над проектом, когда новые правила были успешно интегрированы в систему.

Модель экспертной системы, разработанная для автоматизации диагностики бактериальной устойчивости, подчеркивает важность наличия качественных и полных данных. В условиях клинической практики, где требуется быстрая реакция на выбор антибиотиков, развитие технологий в этой области становится критически важным. Своевременная и точная диагностика инфекций, а также правильный выбор антибиотикотерапии являются ключевыми аспектами в борьбе с бактериальной резистентностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Варламов О. О.* Эволюционные базы данных и знаний для адаптивного синтеза интеллектуальных систем. Миварное информационное пространство. М.: Радио и связь, 2002. 286 с. EDN: RWTCOP
2. *Торжков М. С., Королева Ю. П., Балдин А. В. и др.* Создание миварной экспертной системы для выполнения этических аспектов искусственного интеллекта для скоринга

кредитования // Проблемы искусственного интеллекта. 2024. № 4(35). С. 139–150. DOI: 10.24412/2413-7383-2024-4-139-150. EDN: BHOQXX

3. Varlamov O.O., Chuvikov D.A., Adamova L.E. et al. Logical, philosophical and ethical aspects of AI in medicine // International Journal of Machine Learning and Computing. 2019. Vol. 9. No. 6. Pp. 868–873. DOI: 10.18178/IJMLC. EDN: XJPKWA

4. Varlamov O.O., Chuvikov D.A., Lemondzhava V.N. et al. A software package supporting decision making on the safety of thermolabile blood components // Biomedical Engineering. 2022. Vol. 55. No. 5. Pp. 355–359. DOI: 10.1007/s10527-022-10135-0. EDN: ICRHIB

5. Мащенко Е. И., Карпов Д. К., Варламов О. О. и др. Создание миварной экспертной системы для понимания образов и принятия решений при обнаружении падений людей // Проблемы искусственного интеллекта. 2024. № 4(35). С. 88–100. DOI: 10.24412/2413-7383-2024-4-88-100. EDN: FGLHZZ

6. Подопригорова Н. С., Козырев С. А., Подопригорова С. С. и др. Разработка миварной экспертной системы для выбора алгоритма консенсуса распределенных реестров // Проблемы искусственного интеллекта. 2024. № 4(35). С. 126–138. DOI: 10.24412/2413-7383-2024-4-126-138. EDN: AVXOTO

7. Шэнь Ц., Гун Ш., Варламов О.О. и др. Динамическое планирование траектории робота на основе семантического обнаружения объектов с использованием миварной экспертной системы // Проблемы искусственного интеллекта. 2024. № 4(35). С. 164–176. DOI: 10.24412/2413-7383-2024-4-164-176. EDN: DHVOFC

8. Chuvikov D.A., Kazakova N.A., Varlamov O.O., Golovizhin A.V. 3D modeling and 3D objects creation technology analysis for various intelligent systems // International Journal of Advanced Studies. 2014. Vol. 4. No. 4. Pp. 16–22. DOI: 10.12731/2227-930X-2014-4-3. EDN: TEBOFL

9. Варламов О. О. Создание Больших Знаний и расширение областей применения миварных технологий логического искусственного интеллекта // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2023. № 4(32). С. 30–41. DOI: 10.25729/ESI.2023.32.4.003. EDN: THBEWN

10. Варламов О. О. Миварные технологии как некоторые направления искусственного интеллекта // Проблемы искусственного интеллекта. 2015. № 1(1). С. 23–37. EDN: WDNPGZ

11. Варламов О. О. Автоматизация умственной деятельности людей через логический искусственный интеллект как фундаментальный механизм развития или гибели человечества // Проблемы искусственного интеллекта. 2017. № 3(6). С. 23–31. EDN: YNTRSV

12. Варламов О. О., Лазарев В. М., Чувилов Д. А. О перспективах создания автономных интеллектуальных роботов на основе миварных технологий // Радиопромышленность. 2016. № 4. С. 96–105. EDN: UQEVLG

13. Владимиров А. Н., Носов А. В., Потапова Т. С. Применение многопроцессорного вычислительного кластера НИИР для распараллеливания алгоритмов в научно-технических и вычислительных задачах // Труды НИИ Радио. 2009. № 3. С. 120–123. EDN: KYNLNN

14. Семенов А. А. Исследование способов подбора рекламных кампаний на основе сравнения многомерных векторов // Проблемы искусственного интеллекта. 2020. № 1(16). С. 89–104. EDN: UEBEPL

15. Штрак А. А. Миварная база знаний для автоматизации исследования открытого артериального протока и слуха // МИВАР'24: Сборник научных статей. 2024. С. 548–556. EDN: SXPYDW

16. Клинова В. К. МБЗ портативного спирометра для обеспечения индивидуального контроля функций внешнего дыхания // МИВАР'24: Сборник научных статей. 2024. С. 557–561. EDN: GHUNIK
17. Аброчнов Е. С., Соловьева А. М., Макеев В. А. и др. МЭС подбора полезных продуктов // МИВАР'24: Сборник научных статей. 2024. С. 536–542. EDN: MRBKXC
18. Овчинников Д. А., Милевич А. А., Фонин М. А. и др. МЭС для улучшения сегментации деревьев из облака точек // МИВАР'24: Сборник научных статей. 2024. С. 293–297. EDN: NOGUPU
19. Абдрашитова А. Н., Вардумян А. Т., Головацкий А. Д. и др. Облачная система создания МБЗ // МИВАР'24: Сборник научных статей. 2024. С. 455–459. EDN: LKDKGC
20. Чувиков Д. А., Ким Р. И., Балдин А. В. Анализ больших языковых моделей для построения диалоговых систем // МИВАР'24: Сборник научных статей. 2024. С. 426–431. EDN: IWVZPS
21. Варламов О. О., Егоров С. А. Развитие миварных технологий смысловой обработки потоков текстовых данных // МИВАР'22: Сборник научных статей. 2022. С. 194–212. EDN: PBFFTZ
22. Коценко А. А. Анализ применения для АСУТП миварных сетей в формате двудольных и трехдольных графов // МИВАР'24: Сборник научных статей. 2024. С. 432–438. EDN: GLJGZV
23. Хабчаева А. Р., Чежегова П. А. и др. МЭС для категорирования КИИ в АСУТП // МИВАР'24: Сборник научных статей. 2024. С. 37–41. EDN: VEAGPO
24. Коваленко А. В., Кондрахин С. С., Смыслов Д. О. МЭС по подбору игрового тренажера для развития навыков управления транспортным средством // МИВАР'24: Сборник научных статей. 2024. С. 67–72. EDN: ZOHOUI
25. Рудзинский В. В. МБЗ техподдержки высоконагруженного безотказного кластера // МИВАР'24: Сборник научных статей. 2024. С. 169–173. EDN: ZJYOTC
26. Старых Ф. А. МЭС оценки содержимого пакетных данных в локальной сети // МИВАР'24: Сборник научных статей. 2024. С. 102–106. EDN: FKVQMO
27. Плешаков В. И. Разработка миварной машины логического вывода для процессора Эльбрус. МИВАР'24: Сборник научных статей. 2024. С. 450–454. EDN: EJDCAK
28. Коценко А. А. Разработка моделей миварного логического пространства для обеспечения трехмерного движения автономных роботов // МИВАР'24: Сборник научных статей. 2024. С. 361–366. EDN: HBLZQY
29. Синицын Л. С. Платформа для СПР робота на базе гибридной интеллектуальной системы // МИВАР'24: Сборник научных статей. 2024. С. 384–388. EDN: QOSPPH
30. Варламов О. О. О создании на основе миварных систем принятия решений «РОБО!РАЗУМ» групп автономных комбайнов и тракторов для сельского хозяйства // Проблемы искусственного интеллекта. 2019. № 2(13). С. 49–62. EDN: AMUYCK
31. Федюнев А. Ю., Нестеров Ю. Г., Правдина А. Д. МЭС для контроля микроклимата в оранжерее // МИВАР'24: Сборник научных статей. 2024. С. 107–112. EDN: HSWYCI
32. Варламов О. О. 2024: обзор областей применения миварных технологий ЛИИ. МИВАР'24: Сборник научных статей. 2024. С. 7–15. EDN: ATMAZU
33. Andreev A., Kotsenko A., Varlamov O. et al. Text processing using LLM for automatic creation of agricultural crops knowledge bases // Bio Web of Conferences: International scientific conference on biotechnology and food technology (BFT-2024). Les Ulis: EDP Sciences, 2024. Vol. 130. P. 01029. DOI: 10.1051/bioconf/202413001029. EDN: YTLLMF

34. Aladin D.V., Aladina E. V., Chuvikov D.A. et al. Creating a "Logical intelligent plant care system" in digital agriculture based on Mivar approach // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022. Vol. 954. P. 012004. DOI: 10.1088/1755-1315/954/1/012004. EDN: HODWVY
35. Chuvikov D.A., Aladin D.V., Adamova L.E. et al. A new method for creating Mivar knowledge bases in tabular-matrix form for ground intelligent vehicle control systems // Journal of Physics: Conference Series: International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering, 2021. Vol. 2061. P. 012123. DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012123. EDN: SLARYS
36. Aladin D.V., Varlamov O.O., Chuvikov D.A. et al. Control of vehicles and robots: Creation of planning systems in the state space (MIPRA) // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Conference of Young Scientists and Students "Topical Problems of Mechanical Engineering", 2020. Vol. 747. P. 012097. DOI: 10.1088/1757-899X/747/1/012097. EDN: OYOOVR
37. Tabish A., Sarfaraz Ah., Muhammad A. Artificial Intelligence for Antimicrobial Resistance Prediction: Challenges and Opportunities towards Practical Implementation // Antibiotics (Basel). 2023. Vol. 12. No. 3. P. 523. DOI: 10.3390/antibiotics12030523
38. Tang R., Luo R., Tang S. et al. Machine learning in predicting antimicrobial resistance: a systematic review and meta-analysis // Int J Antimicrob Agents. 2022. No. 60(5–6). P. 106684. DOI: 10.1016/j.ijantimicag.2022.106684
39. Bilal H., Khan M.N., Khan S. et al. The role of artificial intelligence and machine learning in predicting and combating antimicrobial resistance // Comput Struct Biotechnol J. 2025. No. 27. Pp. 423–439. Available at: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11791014/> (accessed 01.03.2025)
40. De Vries S., Ten Doesschate T., Totté JEE. et al. A semi-supervised decision support system to facilitate antibiotic stewardship for urinary tract infections // Comput Biol Med. 2022. No. 146. P. 105621. DOI: 10.1016/j.compbiomed.2022.105621
41. Foroughi M., Arzehgar A., Seyedhasani S.N. et al. Application of machine learning for antibiotic resistance in water and wastewater: A systematic review // Chemosphere. 2024 DOI: 10.1016/j.chemosphere.2024.142223

REFERENCES

1. Varlamov O.O. *Evolyutsionnyye bazy dannykh i znaniy dlya adaptivnogo sinteza intellektual'nykh sistem. Mivarnoye informatsionnoye prostranstvo* [Evolutionary databases and knowledge for adaptive synthesis of intelligent systems. mivar information space]. Moscow: Radio i svyaz'. 2002. 286 p. EDN: RWTCOP. (In Russian)
2. Torzhkov M.S., Koroleva Yu.P., Baldin A.V., et al. Creation of a mivar expert system for addressing ethical aspects of artificial intelligence for credit scoring. *Problems of Artificial Intelligence*. 2024. No. 4(35). Pp. 139–150. DOI: 10.24412/2413-7383-2024-4-139-150. EDN: BHOQXX. (In Russian)
3. Varlamov O.O., Chuvikov D.A., Adamova L.E. et al. Logical, philosophical and ethical aspects of AI in medicine. *International Journal of Machine Learning and Computing*. 2019. Vol. 9. No. 6. Pp. 868–873. DOI: 10.18178/IJMLC. EDN: XJPKWA
4. Varlamov O.O., Chuvikov D.A., Lemondzhava V.N. et al. A software package supporting decision making on the safety of thermolabile blood components. *Biomedical Engineering*. 2022. Vol. 55. No. 5. Pp. 355–359. DOI: 10.1007/s10527-022-10135-0. EDN: ICRHIB.

5. Mashchenko E.I., Karpov D.K., Varlamov O.O. et al. Creation of a mivar expert system for understanding images and decision-making in fall detection. *Problems of Artificial Intelligence*. 2024. No. 4(35). Pp. 88–100. DOI: 10.24412/2413-7383-2024-4-88-100. EDN: FGLHZZ. (In Russian)
6. Podoprigozova N.S., Kozyrev S.A., Podoprigozova S.S. et al. Development of a mivar expert system for consensus algorithm selection in distributed ledgers. *Problems of Artificial Intelligence*. 2024. No. 4(35). Pp. 126–138. DOI: 10.24412/2413-7383-2024-4-126-138. EDN: AVXOTO. (In Russian)
7. Shen C., Gun Sh., Varlamov O.O. et al. Dynamic trajectory planning for robots based on semantic object detection using a mivar expert system. *Problems of Artificial Intelligence*. 2024. No. 4(35). Pp. 164–176. DOI: 10.24412/2413-7383-2024-4-164-176. EDN: DHVOFC. (In Russian)
8. Chuvikov D.A., Kazakova N.A., Varlamov O.O., Golovizhin A.V. 3D Modeling and 3D objects creation technology analysis for various intelligent systems. *International Journal of Advanced Studies*. 2014. Vol. 4. No. 4. Pp. 16–22. DOI: 10.12731/2227-930X-2014-4-3. EDN: TEBOFL
9. Varlamov O.O. Creation of large knowledge bases and expansion of the application areas of mivar logical artificial intelligence technologies. *Information and Mathematical Technologies in Science and Management*. 2023. No. 4(32). Pp. 30–41. DOI: 10.25729/ESI.2023.32.4.003. EDN: THBEWN. (In Russian)
10. Varlamov O.O. Mivar technologies as certain directions of artificial intelligence. *Problems of Artificial Intelligence*. 2015. No. 1(1). Pp. 23–37. EDN: WDNPGZ. (In Russian)
11. Varlamov O.O. Automation of Human Mental Activities via Logical Artificial Intelligence as a Fundamental Mechanism for Humanity's Development or Destruction. *Problems of Artificial Intelligence*. 2017. No. 3(6). Pp. 23–31. EDN: YNTRSV. (In Russian)
12. Varlamov O.O., Lazarev V.M., Chuvikov D.A. On the prospects of creating autonomous intelligent robots based on mivar technologies. *Radio Industry*. 2016. No. 4. Pp. 96–105. EDN: UQEVLG. (In Russian)
13. Vladimirov A.N., Nosov A.V., Potapova T.S. Application of the multiprocessor computing cluster niir for parallelizing algorithms in scientific-technical and computational tasks. *Trudy NII Radio* [Proceedings of the NIIR Radio Institute]. 2009. No. 3. Pp. 120–123. EDN: KYNLNN. (In Russian)
14. Semenov A.A. Research on the selection methods for advertising campaigns based on comparison of multidimensional vectors. *Problems of Artificial Intelligence*. 2020. No. 1(16). Pp. 89–104. EDN: UEBEPL. (In Russian)
15. Shtrak A.A. Mivar knowledge base for automating the study of patent ductus arteriosus and hearing. *MIVAR'24: Sbornik nauchnykh statey* [MIVAR'24: Collection of Scientific Articles]. 2024. Pp. 548–556. EDN: SXPYDW. (In Russian)
16. Klinova V.K. Mivar knowledge base of portable spirometer for individual control of external respiratory functions. *MIVAR'24: Sbornik nauchnykh statey* [MIVAR'24: Collection of Scientific Articles]. 2024. Pp. 557–561. EDN: GHUNIK. (In Russian)
17. Abrochnov E.S., Solovyeva A.M., Makeev V.A. et al. MES for selecting beneficial products. *MIVAR'24: Sbornik nauchnykh statey* [MIVAR'24: Collection of Scientific Articles]. 2024. Pp. 536–542. EDN: MRBKXC. (In Russian)
18. Ovchinnikov D.A., Milevich A.A., Fonin M.A. et al. MES for improving the segmentation of trees from a point cloud. *MIVAR'24: Sbornik nauchnykh statey* [MIVAR'24: Collection of Scientific Articles]. 2024. Pp. 293–297. EDN: NOGUPU. (In Russian)

19. Abdrashitova A.N., Vardumyan A.T., Golovatsky A.D. et al. Cloud system for creating mivar knowledge bases. *MIVAR'24: Sbornik nauchnykh statey* [MIVAR'24: Collection of Scientific Articles]. 2024. Pp. 455–459. EDN: LKDKGC. (In Russian)
20. Chuvikov D.A., Kim R.I., Baldin A.V. Analysis of large language models for building dialog systems. *MIVAR'24: Sbornik nauchnykh statey* [MIVAR'24: Collection of Scientific Articles]. 2024. Pp. 426–431. EDN: IWVZPS. (In Russian)
21. Varlamov O.O., Egorov S.A. Development of mivar technologies for semantic processing of text data streams. *MIVAR'22: Sbornik nauchnykh statey* [MIVAR'22: Collection of Scientific Articles]. 2022. Pp. 194–212. EDN: PBFFTZ. (In Russian)
22. Kotsenko A.A. Analysis of the application of mivar networks for automated process control systems using bipartite and tripartite graphs. *MIVAR'24: Sbornik nauchnykh statey* [MIVAR'24: Collection of Scientific Articles]. 2024. Pp. 432–438. EDN: GLJGZV. (In Russian)
23. Khabchaeva A.R., Chezegova P.A. et al. MES for categorizing critical information infrastructure in automated process control systems. *MIVAR'24: Sbornik nauchnykh statey* [MIVAR'24: Collection of Scientific Articles]. 2024. Pp. 37–41. EDN: VEAGPO. (In Russian)
24. Kovalenko A.V., Kondrakhin S.S., Smyslov D.O. MES for selecting a driving simulator for vehicle control skills development. *MIVAR'24: Sbornik nauchnykh statey* [MIVAR'24: Collection of Scientific Articles]. 2024. Pp. 67–72. EDN: ZO XOUI. (In Russian)
25. Rudzinsky V.V. Mivar knowledge base for technical support of high-load fail-safe clusters. *MIVAR'24: Sbornik nauchnykh statey* [MIVAR'24: Collection of Scientific Articles]. 2024. Pp. 169–173. EDN: ZJYOTC. (In Russian)
26. Starykh F.A. MES for evaluating the content of packet data in a local network. *MIVAR'24: Sbornik nauchnykh statey* [MIVAR'24: Collection of Scientific Articles]. 2024. Pp. 102–106. EDN: FKVQMO. (In Russian)
27. Pleshakov V.I. Development of a mivar logical inference machine for the Elbrus processor. *MIVAR'24: Sbornik nauchnykh statey* [MIVAR'24: Collection of Scientific Articles]. 2024. Pp. 450–454. EDN: EJDCAK. (In Russian)
28. Kotsenko A.A. Development of mivar logical space models for ensuring 3d movement of autonomous robots. *MIVAR'24: Sbornik nauchnykh statey* [MIVAR'24: Collection of Scientific Articles]. 2024. Pp. 361–366. EDN: HBLZQY. (In Russian)
29. Sinitsyn L.S. Platform for SPR robot based on hybrid intelligent system. *MIVAR'24: Sbornik nauchnykh statey* [MIVAR'24: Collection of Scientific Articles]. 2024. Pp. 384–388. EDN: QOSPPH. (In Russian)
30. Varlamov O.O. On the creation of autonomous harvesters and tractors for agriculture based on mivar decision-making systems "ROBO!RAZUM". *Problemy iskusstvennogo intellekta* [Problems of Artificial Intelligence]. 2019. No. 2(13). Pp. 49–62. EDN: AMUYCK. (In Russian)
31. Fedyunov A.Yu., Nesterov Yu.G., Pravdina A.D. MES for climate control in a greenhouse. *MIVAR'24: Sbornik nauchnykh statey* [MIVAR'24: Collection of Scientific Articles]. 2024. Pp. 107–112. EDN: HSWYCJ. (In Russian)
32. Varlamov O.O. 2024: An overview of the application areas of mivar logical artificial intelligence technologies. *MIVAR'24: Sbornik nauchnykh statey* [MIVAR'24: Collection of Scientific Articles]. 2024. Pp. 7–15. EDN: ATMAZU. (In Russian)
33. Andreev A., Kotsenko A., Varlamov O. et al. Text Processing using LLM for automatic creation of agricultural crops knowledge bases. *Bio Web of Conferences: International Scientific*

Conference on Biotechnology and Food Technology (BFT-2024). Vol. 130. Les Ulis: EDP Sciences, 2024. P. 01029. DOI: 10.1051/bioconf/202413001029. EDN: YTLLMF

34. Aladin D.V., Aladina E.V., Chuvikov D.A. et al. Creating a "Logical intelligent plant care system" in digital agriculture based on mivar approach. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2022. Vol. 954. P. 012004. DOI: 10.1088/1755-1315/954/1/012004. EDN: HODWVY

35. Chuvikov D.A., Aladin D.V., Adamova L.E. et al. A new method for creating mivar knowledge bases in tabular-matrix form for ground intelligent vehicle control systems. *Journal of Physics: Conference Series: International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering*. 2021. Vol. 2061. P. 012123. DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012123. EDN: SLARYS

36. Aladin D.V., Varlamov O.O., Chuvikov D.A. et al. Control of vehicles and robots: creation of planning systems in the state space (MIPRA). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Conference of Young Scientists and Students "Topical Problems of Mechanical Engineering"*, 2020. Vol. 747. P. 012097. DOI: 10.1088/1757-899X/747/1/012097. EDN: OYOOVR

37. Tabish A., Sarfaraz Ah., Muhammad A. Artificial intelligence for antimicrobial resistance prediction: challenges and opportunities towards practical implementation. *Antibiotics (Basel)*. 2023. Vol. 12(3). P. 523. DOI: 10.3390/antibiotics12030523

38. Tang R., Luo R., Tang S. et al. Machine learning in predicting antimicrobial resistance: a systematic review and meta-analysis. *Int J Antimicrob Agents*. 2022. Vol. 60. No. 5–6. P. 106684. DOI: 10.1016/j.ijantimicag.2022.106684

39. Bilal H., Khan M.N., Khan S. et al. The role of artificial intelligence and machine learning in predicting and combating antimicrobial resistance. *Comput Struct Biotechnol J*. 2025. Vol. 27. Pp. 423–439. Available at: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11791014/> (accessed 01.03.2025)

40. De Vries S., Ten Doesschate T., Totté JEE et al. A semi-supervised decision support system to facilitate antibiotic stewardship for urinary tract infections. *Comput Biol Med*. 2022. Vol. 146. P. 105621. DOI: 10.1016/j.compbio.2022.105621

41. Foroughi M., Arzehgar A., Seyedhasani S.N. et al. Application of machine learning for antibiotic resistance in water and wastewater: A systematic review. *Chemosphere*. 2024. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2024.142223

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Информация об авторах

Салахутдинова Нурия Чингизовна, студент, Институт искусственного интеллекта Российского технологического университета МИРЭА;

119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, 78;

vnechkv@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3531-944X>

Варламов Олег Олегович, д-р техн. наук, профессор:

1) профессор базовой кафедры № 254 вычислительных комплексов, Институт искусственного интеллекта Российского технологического университета МИРЭА;

119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, 78;

2) профессор кафедры систем обработки информации и управления, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана;

105005, Россия, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, корп. 1;

3) гл. науч. сотр., АО НИИ вычислительных комплексов имени М. А. Карцева;

117437, Россия, Москва, ул. Профсоюзная, 108;

ovar@narod.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6081-3076>, SPIN-код: 7983-9762

Information about the authors

Nuriya Ch. Salahutdinova, Student of the Institute of Artificial Intelligence of the Russian Technological University MIREA;

119454, Russia, Moscow, 78 Vernadsky avenue;

vnechkv@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3531-944X>

Oleg O. Varlamov, Doctor of Technical Sciences, Professor:

1) Professor at the Department of Computational Complexes, Institute of Artificial Intelligence of the Russian Technological University MIREA;

119454, Russia, Moscow, 78 Vernadsky avenue;

2) Professor at the Department of Information Processing Systems and Control, Moscow State Technical University named after N. E. Bauman;

105005, Russia, Moscow, corp. 1, building 5, 2nd Baumanskaya street;

3) Chief Researcher at JSC M. A. Kartsev Research Institute of Computing Systems;

117437, Russia, Moscow, 108 Profsoyuznaya street;

ovar@narod.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6081-3076>, SPIN-code: 7983-9762

УДК 551.50+004.942

Научная статья

DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-2-74-85

EDN: MSQZQQ

Компьютерное моделирование в среде Maple динамических процессов в условиях неопределенности на примере задачи метеорологии

О. В. Кудринская, Р. И. Паровик✉

Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга
683032, Россия, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Пограничная, 4

Аннотация. В статье проводится компьютерное моделирование погодных условий на основе данных атмосферного давления с привлечением теории нечетких множеств. В среде компьютерной математики Maple2021 с привлечением библиотеки линейной алгебры LinearAlgebra был реализован алгоритм расчета детерминированных и интегральных индексов ранжирования для нечетких множеств, которые характеризуют погодные условия. Исследования показали, что при умеренном атмосферном давлении на следующий день наблюдается более солнечная погода по сравнению с ситуацией, когда давление крайне низкое. На конкретных примерах было показано, что интегральные индексы ранжирования обеспечивают более точные результаты, чем детерминированные индексы ранжирования.

Ключевые слова: модель, нечеткие множества, интегральные индексы ранжирования, неопределенность, алгоритм, Maple2021, атмосферное давление, погода

Поступила 15.03.2025, одобрена после рецензирования 09.04.2025, принята к публикации 10.04.2025

Для цитирования. Кудринская О. В., Паровик Р. И. Компьютерное моделирование в среде Maple динамических процессов в условиях неопределенности на примере задачи метеорологии // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2025. Т. 27. № 2. С. 74–85. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-2-74-85

MSC: 94D05, 86A10

Original article

Computer modeling in the Maple environment of dynamic processes under uncertainty conditions using a meteorological problem as an example

O.B. Kudrinskaya, R.I. Parovik✉

Vitus Bering Kamchatka State University
683032, Russia, Petropavlovsk-Kamchatsky, 4 Pogranichnaya street

Abstract. Computer modeling of weather conditions based on atmospheric pressure data is carried out in the article with the help of the theory of fuzzy sets. An algorithm was implemented for calculating integral ranking indices for fuzzy sets that characterize weather conditions in the computer mathematics program Maple2021, with the help of the LinearAlgebra library. It was shown that if the atmospheric pressure is not very high, the next day will be "sunnier", than in the case when the pressure is "very low". It was confirmed that integral ranking indices give more accurate information than deterministic ranking indices.

Keywords: model, fuzzy sets, integral ranking indices, uncertainty, algorithm, Maple2021, atmospheric pressure, weather

For citation. Kudrinskaya O.B., Parovik R.I. Computer modeling in the Maple environment of dynamic processes under uncertainty conditions using a meteorological problem as an example. News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS. 2025. Vol. 27. No. 2. Pp. 74–85. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-2-74-85

ВВЕДЕНИЕ

В современных исследованиях большое внимание уделяется проблеме моделирования динамических процессов, характеризующихся неопределенностью и неполнотой исходной информации. Одним из эффективных инструментов для решения подобных задач является теория нечетких множеств [1–5], которая позволяет описывать явления, где традиционные модели с четкими границами не дают удовлетворительных результатов.

Динамические процессы, протекающие в сложных системах, часто обусловлены внешними и внутренними флуктуациями, шумами и случайными воздействиями, что приводит к появлению неопределенности в исходных данных. Традиционные модели не всегда могут адекватно описывать подобные явления. В этой связи внедрение нечеткой логики в процесс моделирования становится важным направлением, так как оно позволяет учитывать нечеткость параметров, неопределенность границ и нечеткую зависимость состояний системы. Например, нечеткие множества применяют в биологии [6], в экономике [7], метеорологии [8] и т.д.

При анализе сложных систем исследователи сталкиваются с парадоксом: чем сложнее система, тем менее точными становятся суждения о ее поведении, однако именно такие суждения часто имеют наибольшую практическую ценность.

Закономерности, описывающие процессы и явления в условиях неопределенности, связаны со случайными событиями, которые могут развиваться по-разному даже при идентичных условиях. Если рассматривать природу этих закономерностей как явлений, находящихся в условиях неопределенности, важно учитывать, что описание такой неопределенности может варьироваться в зависимости от объема и качества доступных данных. Следовательно, точный количественный анализ поведения сложных систем оказывается недостаточным для практического исследования реальных ситуаций. В таких случаях возникает необходимость применения методов, где элементами анализа выступают не числа, а нечеткие множества.

Нечеткое множество представляет собой математическую модель класса с размытыми границами. Основой этого подхода является логика, оперирующая нечеткой истинностью, нечеткими связями и нечеткими правилами вывода.

В настоящей работе применяется методология нечетких множеств к решению задачи метеорологии (прогнозирования погоды) [8–11] с помощью среды символьной математики Maple [12]. Реализован алгоритм расчета интегральных индексов ранжирования для нечетких множеств. Показано, что метод интегральных индексов работает лучше, чем метод детерминированных индексов ранжирования.

ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ

Теория нечетких множеств, предложенная Л. А. Заде в 1965 году [1], расширяет классическую теорию множеств, вводя понятие степени принадлежности элемента к множеству. Вместо традиционного булевого значения (0 или 1) каждому элементу сопоставляется число $\mu(x)$, которому соответствуют значения из интервала $[0,1]$. Введем некоторые основные определения теории нечетких множеств. Более подробно с этой теорией нечетких множеств можно ознакомиться в работах [1–5].

Определение 1. Функция принадлежности определяется следующим образом:

$$\mu_A(x): X \rightarrow [0,1], \quad (1)$$

где X – универсум дискурса, а A – нечеткое множество.

Определение 2. Универсум дискурса – базовое (универсальное) множество, которое обозначает совокупность всех объектов, которые рассматриваются в рамках данной задачи или модели.

Определение 3. Нечеткое множество A определяется

$$A = \bigcup_{x \in X} \mu_A(x)/x. \quad (2)$$

В формуле (2) знак $/$ означает отделение значения функции принадлежности от соответствующего ей носителя нечеткого множества.

Определение 4. Носителем нечеткого множества A называется множество в обычном смысле, определяемое как

$$S(A) = \{x/x \in U, \mu_A(x) > 0\}. \quad (3)$$

Определение 5. Нечеткое отношение $R: X \rightarrow Y$ определяет бинарное отношение нечетких множеств X и Y , которое записывается в виде:

$$R = \bigcup_{(x,y) \in X \times Y} \mu_R(x,y)/(x,y), \quad (4)$$

где функция принадлежности двух переменных в зависимости от постановки задачи показывает предпочтение или сходство элементов нечетких множеств.

Определение 6. Если между множествами $X \rightarrow Y$ и $Y \rightarrow Z$ имеются бинарные нечеткие отношения, то для определения бинарного отношения $X \rightarrow Z$ вводится операция композиции или максиминное произведение:

$$R \circ S = \bigcup_{x,z \in (X,Z)} \max(\min(\mu_R(x,y), \mu_S(y,z)))/(x,z), \quad (5)$$

где S – отношение $Y \rightarrow Z$.

Операции над четкими множествами можно изучить в работах [1–5, 13].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ

Рассмотрим пример решения задачи метеорологии, взятый из учебного пособия [13]. Многолетние наблюдения за погодой свидетельствуют о том, что высокое атмосферное давление обычно предвещает солнечную погоду на следующий день, тогда как низкое давление чаще всего сопровождается пасмурной погодой.

Требуется установить, какая будет погода, если:

- 1) атмосферное давление «не очень высокое» (высокое, но не самый высокий показатель);
- 2) атмосферное давление «очень невысокое» (низкое, но не самый низкий показатель).

Нужно установить, в каком случае будет «более солнечно».

Для решения этой задачи сначала введем нечеткие множества:

- 1) «высокое давление»;
- 2) «солнечная погода»;
- 3) «пасмурная погода».

Пусть A – «высокое давление» и определяется так:

$$A = (a_1/740; a_2/750; a_3/760; a_4/770; a_5/780;),$$

где $a = (a_1, a_2, a_3, a_4, a_5)$ – вектор, элементами которого являются вероятности появления того или иного значения атмосферного давления, формируется на основе опытных экспертных оценок. Вторые значения определяют носитель числового нечеткого множества A и измеряются в миллиметрах ртутного столба.

Для описания погоды мы введем нечисловые нечеткие множества с элементами носителя:

- 1) «пасмурно»;
- 2) «пасмурно с прояснением»;
- 3) «переменная облачность»;
- 4) «ясно»;
- 5) «солнечно».

Обозначим соответствующие элементы как I, II, III, IV, V, где I – «пасмурно», II – «пасмурно с прояснением», III – «переменная облачность», IV – «ясная погода», V – «солнечно». Тогда можно сформировать следующие нечеткие множества:

$$B = \text{«солнечная погода»} = (0.2/I; 0.3/II; 0.5/III; 0.7/IV; 1/V;),$$

$$C = \text{«пасмурная погода»} = (1/I; 0.8/II; 0.4/III; 0.2/IV; 0.1/V;).$$

Здесь так же, как и для нечеткого множества A , первые значения имеют смысл вероятностей, которые определяются экспертами исходя из опыта наблюдений.

Определим нечеткие множества, которые нам понадобятся для решения задачи, и пусть известен вектор $a = (0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1)$.

$$\begin{aligned}\bar{A} = \text{«невысокое давление»} &= ((1-a_1)/I; (1-a_2)/II; (1-a_3)/III; (1-a_4)/IV; (1-a_5)/V;) = \\ &= (0.8/I; 0.6/II; 0.4/III; 0.2/IV; 0/V;).\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}X_1 = \text{«не очень высокое давление»} &= \bar{A}^2 = \\ &= ((1-a_1^2)/I; (1-a_2^2)/II; (1-a_3^2)/III; (1-a_4^2)/IV; (1-a_5^2)/V;) = \\ &= (0.96/740; 0.84/750; 0.64/760; 0.36/770; 0/780;).\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}X_2 = \text{«не очень высокое давление»} &= (\bar{A})^2 = \\ &= ((1-a_1)^2/I; (1-a_2)^2/II; (1-a_3)^2/III; (1-a_4)^2/IV; (1-a_5)^2/V;) = \\ &= (0.64/740; 0.36/750; 0.16/760; 0.04/770; 0/780;).\end{aligned}$$

Замечание 1. Здесь необходимо отметить, что слово «очень» в теории нечетких множеств эквивалентно операции возведения нечеткого множества в степень [13].

Методика решения поставленной задачи основывается на расчете индекса ранжирования.

Определение 7. Индекс ранжирования представляет собой функцию $H(Y_1, Y_2)$, зависящую от нечетких аргументов, которая используется для их сравнения. Этот индекс определяет, какое из нечетких множеств обладает большей значимостью и, следовательно, является приоритетным.

В качестве методики решения выберем два метода [13]:

- 1) метод, основанный на простейшем детерминированном индексе ранжирования;
- 2) метод, основанный на интегрированном индексе ранжирования.

Простейший детерминированный индекс ранжирования можно записать так [13]:

$$H_5^1(A, B) = \sup_{a > b} \min(\mu(a), \mu(b)), \quad a \in X, b \in Y, \quad (6)$$

где $\sup$ – точная верхняя грань множества.

Кроме того, выполняется свойство $H_5^1(A, B) > H_5^1(B, A) \Rightarrow A > B$. В случае, если выполняется равенство $H_5^1(A, B) = H_5^1(B, A)$, сравнение нечетких множеств не определено и необходимо использовать другой метод решения.

Интегрированный индекс ранжирования определяется по формуле [13]:

$$H_2(A, B) = H_+(A) - H_+(B), \quad H_+(A) = \sum_{\Delta\alpha} M(A^\alpha) \Delta\alpha, \quad (7)$$

где $M(A^\alpha) = \frac{\inf_{a \in A^\alpha} a + \sup_{a \in A^\alpha} a}{2}$, A^α – α – уровневое подмножество нечеткого множества A , $\inf$ – точная нижняя грань множества. Причем выполняется соотношение

$$H_2(A, B) \geq 0 \Rightarrow A > B.$$

Замечание 2. Как будет показано ниже, интегральные индексы ранжирования (7) приводят нас к более точному результату, чем детерминированные индексы ранжирования (6).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Составим нечеткое отношение: если высокое давление (A), то будет солнечная погода (B), иначе будет пасмурная погода (C). Это отношение будет определяться по формуле [13]:

$$R = A \times B \cup \bar{A} \times C.$$

В силу того, что это соотношение представляет операции над матрицами, воспользуемся библиотекой LinearAlgebra среды символьной компьютерной математики Maple2021. Отметим также, что приведенный ниже алгоритм можно реализовать в табличном процессоре Microsoft Excel с помощью применения инструмента «Поиск решения» [14].

На языке Maple процедура для нечеткого отношения R имеет вид:

```
MaxMinCompose := proc(X, R)
local i, j, m, n, Y;
m := nops(X); n := ColumnDimension(R); Y := Vector(n, fill = 0);
for j to n do
    Y[j] := max(seq(min(X[i][2], R[i, j]), i = 1 .. m));
end do;
Y;
end proc
```

Результат работы процедуры – квадратная матрица вида:

$$\begin{bmatrix} 0,8 & 0,8 & 0,4 & 0,2 & 0,2 \\ 0,6 & 0,6 & 0,4 & 0,4 & 0,4 \\ 0,4 & 0,4 & 0,5 & 0,6 & 0,6 \\ 0,2 & 0,3 & 0,5 & 0,7 & 0,8 \\ 0,2 & 0,3 & 0,5 & 0,7 & 1 \end{bmatrix}$$

Далее, исходя из формулы (5) и составного правила вывода [13], находим векторы Y_1 и Y_2 :

$$Y_1 = X_1 \circ R, Y_2 = X_2 \circ R.$$

Для этого можно использовать процедуру, описанную выше:

$$Y1 := \text{MaxMinCompose}(X1, R);$$

$$Y_1 = (0,8/I; 0,8/II; 0,5/III; 0,6/IV; 0,6/V)$$

$$Y2 := \text{MaxMinCompose}(X2, R);$$

$$Y_2 = (0,64/I; 0,64/II; 0,4/III; 0,36/IV; 0,36/V)$$

С учетом носителя визуализация векторов Y_1 и Y_2 представлена на рис. 1.

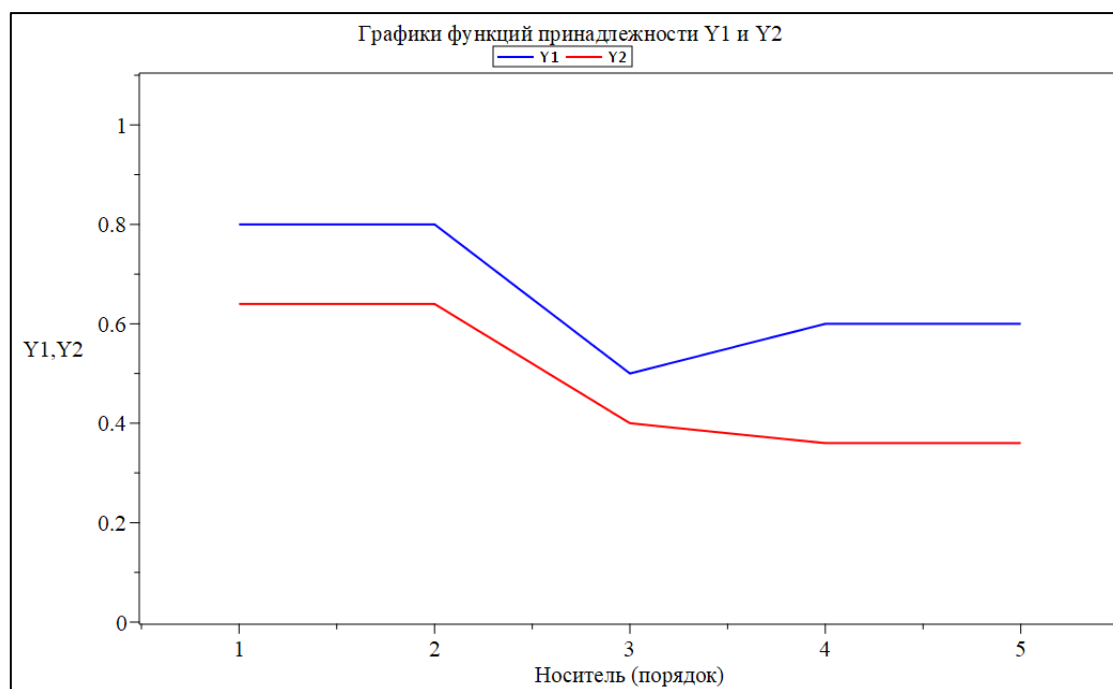


Рис. 1. Графики Y_1 и Y_2 / Fig. 1. Graphs Y_1 and Y_2

Здесь можно отметить, что графики в основном себя ведут одинаково, кроме участка от 3 до 4.

Для сравнения нечетких множеств Y_1 и Y_2 сначала будем использовать детерминированный индекс ранжирования, рассчитанный по формуле (6). В системе Maple2021 определим функцию принадлежности $\mu(y)$:

```

mu:= y -> y;
H_Y1_Y2 := max(seq(seq(min(mu(Y1[i]), mu(Y2[j])), j = 1 .. nops(Y2)), i = 1 .. nops(Y1)));
H_Y2_Y1 := max(seq(seq(min(mu(Y2[i]), mu(Y1[j])), j = 1 .. nops(Y1)), i = 1 .. nops(Y2)));
printf("Простейший индекс ранжирования H(Y1, Y2) = %f\n", H_Y1_Y2);
printf("Простейший индекс ранжирования H(Y2, Y1) = %f\n", H_Y2_Y1);
    Простейший индекс ранжирования H(Y1, Y2) = 0.640000;
    Простейший индекс ранжирования H(Y2, Y1) = 0.640000.

```

Одинаковые результаты, полученные с помощью детерминированного индекса ранжирования для нечетких множеств Y_1 и Y_2 , свидетельствуют о его ограниченности в данном контексте. Это не позволяет определить, при каком условии будет «более солнечно».

Замечание 3. Одним из ограничений детерминированных индексов ранжирования является их неспособность учитывать тип и форму функции принадлежности, которая характеризует сравниваемые нечеткие множества. Это ограничение приводит к тому, что такие индексы не могут точно оценить степень сходства или различия между нечеткими множествами, что может негативно сказаться на качестве ранжирования.

Чтобы устранить этот недостаток, применим интегральный индекс ранжирования (7). Реализуем этот метод в программном коде на языке Maple2021. Для этого нам понадобятся следующие пользовательские функции:

1. AlphaCut – функция для расчета α -уровней. Принимает нечеткое множество Y и уровень α . Возвращает список процентных значений, соответствующим элементам, которые $\mu \geq \alpha$.

```

AlphaCut := proc(Y, alpha) local i, result; result := [];
  for i to nops(Y) do
    if alpha <= Y[i][1] then result:= [op(result), Y[i][2]];
  end if;
end do;
return result;
end proc;

```

2. AlphaCut – функция для вычисления среднего значения между минимальным и максимальным процентом в списке. Если список пуст, то возвращает 0.

```

avgCalc := proc(listValues) local sorted, n;
  if nops(listValues) = 0 then return 0;
  end if;
  sorted := sort(listValues);
  n := nops(sorted); return 1/2*sorted[1] + 1/2*sorted[n];
end proc;

```

3. calculate_H_plus_auto – функция для вычисления интегрированного индекса.

```

calculate_H_plus_auto := proc(Y)
  local i, U, n, delta, A, avg_vals, H_plus; U := {};

```

Извлечение уникальных значений μ и сортировка их по возрастанию

```

  for i to nops(Y) do
    U := U union {Y[i][1]};
  end do;
  U:= sort(convert(U, list)); n := nops(U);

```

```

# Вычисление весовых коэффициентов
delta := [];
for i to n do
    if i = 1 then delta := [op(delta), U[1]];
    else delta := [op(delta), U[i] - U[i - 1]];
    end if;
end do;

# Расчет  $\alpha$ -уровней и средних значений для каждого уровня
A := [seq(AlphaCut(Y, U[i]), i = 1 .. n)];
avg_vals := [seq(avgCalc(A[i]), i = 1 .. n)];
# Вычисление интегрального индекса
H_plus := 0;
for i to n do
    H_plus := H_plus + avg_vals[i]*delta[i];
end do;
return H_plus, U, delta, A, avg_vals;
end proc;

```

4. auto_calc – функция для автоматизации расчетов. Принимает нечеткое множество Y . Вызывает вычисление интегрального индекса, выводит результаты и возвращает вычисленные данные.

```

auto_calc := proc(Y)
    local H_plus, U, delta, A, avg_vals;
    H_plus, U, delta, A, avg_vals := calculate_H_plus_auto(Y);
    printf("Результаты для множества:\n");
    printf("Выбранные уровни alpha; (уникальные mu;): %a\n", U);
    printf("Веса Delta; (рассчитаны как разности): %a\n", delta);
    printf("Alpha-уровни (процентные значения): %a\n", A);
    printf("Средние значения для каждого уровня: %a\n", avg_vals);
    printf("Интегральный индекс H+ = %g\n", H_plus); return H_plus, U, delta, A, avg_vals;
end proc.

```

Работа перечисленных выше функций приведена ниже.

Расчет для нечеткого множества Y_1 .

```

Y1:= [[0.8, 5], [0.8, 15], [0.5, 40], [0.6, 80], [0.6, 100]];
printf("\nРасчёты для Y1:\n");
auto_calc(Y1);

```

Расчеты для Y1:

Результаты для множества:

Выбранные уровни alpha; (уникальные mu;): [.5, .6, .8]

Веса Delta; (рассчитаны как разности): [.5, .1, .2]

Alpha-уровни (процентные значения): [[5, 15, 40, 80, 100], [5, 15, 80, 100], [5, 15]]

Средние значения для каждого уровня: [105/2, 105/2, 10]

Интегральный индекс H+ = 33.5.

Расчет для нечеткого множества Y_2 .

```

Y2:= [[0.64, 5], [0.64, 15], [0.4, 40], [0.36, 80], [0.36, 100]];
printf("\nРасчёты для Y2:\n");
auto_calc(Y2);

```

Расчеты для Y_2 :

Результаты для множества:

Выбранные уровни alpha; (уникальные μ_i): [.36, .4, .64]

Веса Delta; (рассчитаны как разности): [.36, .4e-1, .24]

Alpha-уровни (процентные значения): [[5, 15, 40, 80, 100], [5, 15, 40], [5, 15]]

Средние значения для каждого уровня: [105/2, 45/2, 10]

Интегральный индекс $H^+ = 22.2$.

В результате получили $H_+(Y_1) = 33.5$ и $H_+(Y_2) = 22.2$. Откуда следует согласно (7), что $Y_1 > Y_2$. Это означает, что если атмосферное давление не очень высокое, то на следующий день будет «более солнечно», чем в том случае, когда давление «очень невысокое». Это означает, что если атмосферное давление не очень высокое (высокое, но не самый верхний показатель), то на следующий день будет «более солнечно», чем в том случае, когда давление «очень невысокое» (низкое, но не самый низкий показатель).

Рассмотрим другой пример. Пусть

$$A = \text{«высокое давление»} = (0.3/740; 0.4/750; 0.5/760; 0.6/770; 1/780).$$

Остальные нечеткие множества возьмем из предыдущего примера. На рис. 2 приведены графики функций принадлежности Y_1 и Y_2 .

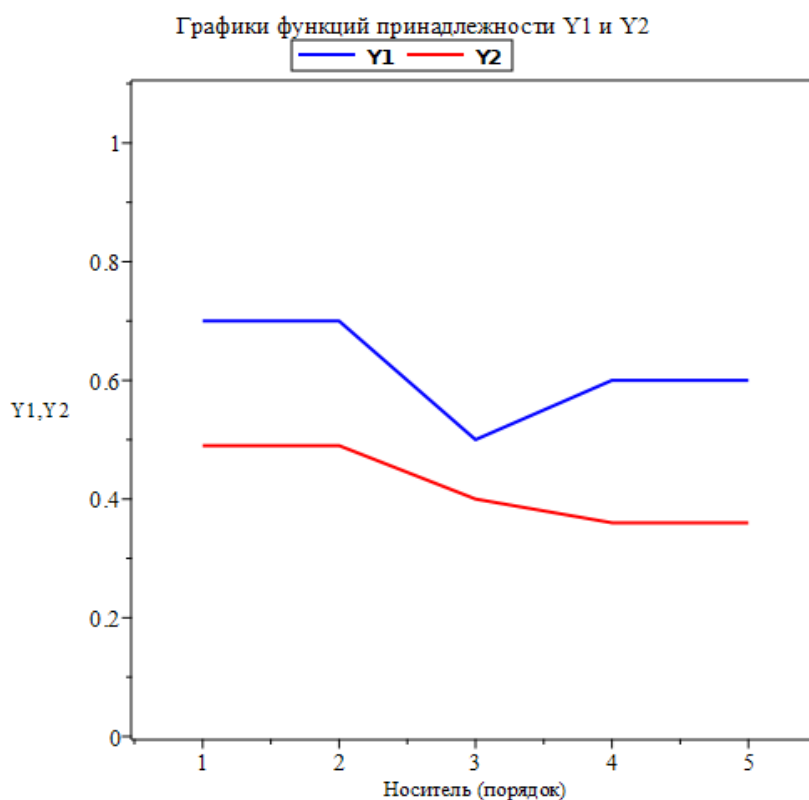


Рис. 2. Графики Y_1 и Y_2 / Fig. 2. Graphs Y_1 and Y_2

Видно, что график функций принадлежности Y_1 и Y_2 изменился по сравнению с аналогичным графиком, представленным на рисунке 1. Значения функции Y_2 падают

практически на более широком диапазоне носителя от 2 до 4. Это указывает на то, что индексы ранжирования также будут меньше. Результат работы алгоритма в Maple2021 приведен ниже.

Простейший индекс ранжирования $H(Y1, Y2) = 0.490000$.

Простейший индекс ранжирования $H(Y2, Y1) = 0.490000$.

Расчеты для Y1:

Результаты для множества:

Выбранные уровни alpha; (уникальные μ_i): [.5, .6, .7];

Весы Delta; (рассчитаны как разности): [.5, .1, .1];

Alpha-уровни (процентные значения): [[5, 15, 40, 80, 100], [5, 15, 80, 100], [5, 15]];

Средние значения для каждого уровня: [105/2, 105/2, 10]

Интегральный индекс $H^+ = 32.5$.

Расчеты для Y2:

Результаты для множества:

Выбранные уровни alpha; (уникальные μ_i): [.36, .4, .49];

Весы Delta; (рассчитаны как разности): [.36, .4e-1, .9e-1];

Alpha-уровни (процентные значения): [[5, 15, 40, 80, 100], [5, 15, 40], [5, 15]];

Средние значения для каждого уровня: [105/2, 45/2, 10];

Интегральный индекс $H^+ = 20.7$.

Здесь мы также видим, что значения индексов ранжирования ожидаемо уменьшились, но тенденция сохранилась – простейший детерминированный индекс не дает однозначного результата. Поэтому интегральный индекс ранжирования здесь дает более точный результат.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе с помощью теории нечетких множеств на конкретном примере показана методика исследования динамических процессов в условиях неопределенности. С помощью компьютерной среды символьной математики Maple был реализован алгоритм расчета интегральных индексов ранжирования. Показано, что интегральные индексы ранжирования дают более точный результат решения, чем детерминированные индексы, так как они учитывают весь спектр распределений нечетких множеств.

Дальнейшее развитие исследований может заключаться в применении теории нечетких множеств к метеорологическим данным по Камчатскому краю по аналогии с работами [9–11]. Другое продолжение исследований может быть связано с применением теории нечетких множеств к обыкновенным дифференциальным уравнениям [15, 16], которые являются модельными для различных динамических процессов в условиях неопределенности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Zadeh L.A. Fuzzy sets. *Information and Control*. 1965. Vol. 8. No. 3. Pp. 338–353.
2. Dubois D.J. Fuzzy sets and systems: theory and applications. New York: Academic press, 1980. Vol. 144.
3. Zadeh L.A., Aliev R.A. Fuzzy logic theory and applications: part I and part II. World Scientific Publishing, 2018. DOI: 10.1142/10936

4. Voskoglou M.G. Fuzzy sets, fuzzy logic and their applications. *MDPI*, 2020. DOI: 10.3390/books978-3-03928-521-1
5. Pedrycz W. An introduction to computing with fuzzy sets. *IEEE ASSP Magazine*. 2021. Vol. 190. 283 p.
6. Yankovyi O., Tsimoshynska O., Koval V., Kazançoğlu Y. Applying fuzzy logic to the assessment of latent economic features. *Advances in soft computing applications*. 2023. Pp. 1–21. DOI: 10.1201/9781003425885-1
7. Suzuki A., Negishi E. Fuzzy logic systems for healthcare applications. *Journal of Biomedical and Sustainable Healthcare Applications*. 2024. Vol. 4. No. 1. DOI: 10.53759/0088/jbsha20240401
8. Cao H., Chen G. Some applications of fuzzy sets to meteorological forecasting. *Fuzzy Sets and Systems*. 1983. Vol. 9. No. 1–3. Pp. 1–12.
9. Gómez V., Casanovas A. Fuzzy logic and meteorological variables: a case study of solar irradiance. *Fuzzy Sets and Systems*. 2002. Vol. 126. No. 1. Pp. 121–128.
10. Aprianti W., Mukhlash I. The application of rough set and fuzzy rough set based algorithm to classify incomplete meteorological data. *2014 International Conference on Data and Software Engineering (ICODSE)*. IEEE, 2014. Pp. 1–6.
11. Małolepsza O., Mikołajewski D., Prokopowicz P. Using fuzzy logic to analyse weather conditions. *Electronics*. 2025. Vol. 14. No. 1. P. 85.
12. Thompson I. Understanding Maple. UK: Cambridge University Press, 2016. 228 p.
13. Трусов П. В. Введение в математическое моделирование. М.: Университетская книга, Логос, 2007. 440 с.
- Trusov P.V. *Vvedeniye v matematicheskoye modelirovaniye* [Introduction to mathematical modeling]. Moscow: Universitetskaya kniga, Logos. 2007. 440 p. (In Russian)
14. Kudrinskaya O.V. Application of the tabletive processor while solving the optimization problems. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-Mat. Nauki*. 2017. No. 1(17). Pp. 68–81. DOI: 10.18454/2079-6641-2017-17-1-68-81
15. Mazandarani M., Xiu L. A review on fuzzy differential equations. *IEEE access*. 2021. Vol. 9. Pp. 62195–62211. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3074245
16. Mazandarani M., Najariyan M. Fuzzy differential equations: conceptual interpretations. *Evolutionary Intelligence*. 2024. Vol. 17. No. 1. Pp. 441–456. DOI: 10.1007/s12065-022-00716-z

Финансирование. Исследование проведено в рамках программы «Приоритет–2030».

Funding. The study was conducted within the framework of the Priority–2030 program.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Вклад авторов:

Р. И. Паровик – постановка задачи, интерпретация результатов,
О. В. Кудринская – расчеты, визуализация и код программы.

Contribution of the authors:

R.I. Parovik – problem statement, results interpretation,
O.V. Kudrinskaya – calculations, visualization and program code.

Информация об авторах

Кудринская Ольга Владимировна, аспирант, Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга;

683032, Россия, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Пограничная, 4;

kudrinskayakam2020@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5874-0534>, SPIN-код: 4892-1103

Паровик Роман Иванович, д-р физ.-мат. наук, доцент, профессор ДВО РАН, профессор кафедры информатики и математики, Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга;

683032, Россия, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Пограничная, 4;

parovik@ikir.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1576-1860>, SPIN-код: 4295-6894

Information about the authors

Olga V. Kudrinskaya, Post-graduate Student, Vitus Bering Kamchatka State University;

683032, Russia, Petropavlovsk-Kamchatsky, 4 Pogranichnaya street;

kudrinskayakam2020@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5874-0534>, SPIN-code: 4892-1103

Roman I. Parovik, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Professor, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Professor of the Department of Computer Science and Mathematics, Vitus Bering Kamchatka State University;

683032, Russia, Petropavlovsk-Kamchatsky, 4 Pogranichnaya street;

parovik@ikir.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1576-1860>, SPIN-code: 4295-6894

УДК 004.852

DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-2-86-102

EDN: NZSEKR

Научная статья

О применении обучения с подкреплением в задаче выбора оптимальной траектории движения

М. Г. Городничев

Московский технический университет связи и информатики
111024, Россия, Москва, ул. Авиамоторная, 8А

Аннотация. В данной статье рассматриваются современные методы обучения с подкреплением, с акцентом на их применение в динамичных и сложных средах. Исследование начинается с анализа основных подходов к обучению с подкреплением, таких как динамическое программирование, методы Монте-Карло, методы временной разницы и градиенты политики. Особое внимание уделяется методологии Generalized Adversarial Imitation Learning (GAIL) и ее влиянию на оптимизацию стратегий агентов. Приведено исследование безмодельного обучения и выделены критерии выбора агентов, способных работать в непрерывных пространствах действий и состояний. Экспериментальная часть посвящена анализу обучения агентов с использованием различных типов сенсоров, включая визуальные, и демонстрирует их способность адаптироваться к условиям среды, несмотря на ограничения разрешения. Представлено сравнение результатов на основе кумулятивной награды и длины эпизода, выявляющее улучшение производительности агентов на поздних этапах обучения. Исследование подтверждает, что использование имитационного обучения значительно повышает эффективность агента, сокращая временные затраты и улучшая стратегии принятия решений. Настоящая работа открывает перспективы для дальнейшего изучения механизмов улучшения разрешающей способности сенсоров и тонкой настройки гиперпараметров.

Ключевые слова: обучение с подкреплением, интеллектуальные агенты, оптимальная траектория, высокоавтоматизированные транспортные средства, обучение на основе политик, архитектуры «актер-критик», имитационное обучение, сенсоры, непрерывные состояния, дискретные состояния, PPO, SAC

Поступила 25.03.2025, одобрена после рецензирования 26.03.2025, принята к публикации 09.04.2025

Для цитирования. Городничев М. Г. О применении обучения с подкреплением в задаче выбора оптимальной траектории движения // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2025. Т. 27. № 2. С. 86–102. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-2-86-102

MSC: 68T07

Original article

On the application of reinforcement learning in the task of choosing the optimal trajectory

M.G. Gorodnichev

Moscow Technical University of Communications and Informatics
111024, Russia, Moscow, 8A Aviamotornaya street

Abstract. This paper reviews state-of-the-art reinforcement learning methods, with a focus on their application in dynamic and complex environments. The study begins by analysing the main approaches to reinforcement learning such as dynamic programming, Monte Carlo methods, time-difference methods

and policy gradients. Special attention is given to the Generalised Adversarial Imitation Learning (GAIL) methodology and its impact on the optimisation of agents' strategies. A study of model-free learning is presented and criteria for selecting agents capable of operating in continuous action and state spaces are highlighted. The experimental part is devoted to analysing the learning of agents using different types of sensors, including visual sensors, and demonstrates their ability to adapt to the environment despite resolution constraints. A comparison of results based on cumulative reward and episode length is presented, revealing improved agent performance in the later stages of training. The study confirms that the use of simulated learning significantly improves agent performance by reducing time costs and improving decision-making strategies. The present work holds promise for further exploration of mechanisms for improving sensor resolution and fine-tuning hyperparameters.

Keywords: reinforcement learning, intelligent agents, optimal trajectory, highly automated vehicles, policy-based learning, actor-critic architectures, simulated learning, sensors, continuous states, discrete states, PPO, SAC

Submitted 25.03.2025,

approved after reviewing 26.03.2025,

accepted for publication 09.04.2025

For citation. Gorodnichev M.G. On the application of reinforcement learning in the task of choosing the optimal trajectory. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2025. Vol. 27. No. 2. Pp. 86–102. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-2-86-102

ВВЕДЕНИЕ

Основной задачей для лиц, ответственных за организацию дорожного движения, является обеспечение безопасности и оптимальности передвижения на дорогах общего пользования. Для решения данной задачи повсеместно внедряются системы помощи водителям (ADAS) различного уровня. Основной причиной аварий является человеческий фактор, который можно снизить за счет ADAS. В последние годы исследования, разработки и внедрение систем автопилотирования приобрели особенно высокий потенциал. Однако ограничениями для внедрения автоматизированных транспортных средств на дорогах общего пользования являются факторы, связанные с законодательством, сертификацией и стандартизацией.

Проблемами при разработке таких систем являются сложность сбора и недостаточность данных. Уровень развития техники на данный момент позволяет создавать сложные и реалистичные симуляции с многообразием параметров. В связи с этим применяются различные виды виртуальных 2D и 3D-симуляторов сложных социально-технических систем. Данный подход позволяет проводить научные исследования, испытания готовых образцов различных систем помощи водителям. Тем самым это позволяет повысить экономическую и ресурсную эффективность.

Цель данного исследования заключается в исследовании эффективности применения обучения с подкреплением (RL) в задаче выбора оптимальной траектории движения высокоавтоматизированных транспортных средств с учетом условий безопасности исходя из продольного и поперечного динамического габарита.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Сравнение обучения агентов RL на основе различной информации.
2. Создание окружения среды и обучение агентов RL на данных для оптимального выбора траектории движения
3. Сравнение производительности различных подходов к обучению.

В рамках данного исследования постараемся ответить на следующие вопросы, которые встают перед исследователями и инженерами в области разработки высокоавтоматизированных транспортных средств:

1. Насколько хорошо обученные агенты выполняют задачу выбора оптимальной траектории движения?
2. Каковы отличия использования RL по сравнению с базовыми моделями?
3. Можно ли выделить класс агентов, которые лучше справляются с задачей выбора оптимальной траектории?

В данной статье под оптимизацией траектории движения будем понимать процесс выбора траектории движения транспортного средства в конкретный момент времени и состоянии с учетом заданной цели.

Высокоавтоматизированное транспортное средство (агент) должно перманентно решать задачу выбора оптимальной траектории движения посредством построения объективной функции, выражающейся в минимизации или максимизации целевой переменной, в первую очередь для поддержания должного уровня безопасности за счет контроля продольного и поперечного динамического габарита. Однако стоит отметить, что нельзя забывать про оптимальность распределения транспортных средств в улично-дорожной сети.

В каждый момент времени t агент наблюдает совокупность векторов из множества T . T – это обратная связь с учетом контекста окружения среды, получаемая с различных типов источников, например, лидаров, сонаров, видеокамер и т.д. Исходя из типа источника информации формируются векторы T . Агент должен уметь обрабатывать данные, поступающие с различных источников. Вектор (P_t) информации о возможных траекториях с учетом состояний (препятствий) определяется следующим образом:

$$P_t = \left[\log \frac{P_{1,t}}{P_{1,t-1}}, \log \frac{P_{2,t}}{P_{2,t-1}}, \dots, \log \frac{P_{M,t}}{P_{M,t-1}} \right]^T \quad \forall P_t \in R^M,$$

где M – общее число возможных траекторий в настоящий момент с учетом состояния.

Как правило, агент включает в себя один или несколько из трех составляющих: политику, модель и функцию вознаграждения. Политика – это набор правил, которыми руководствуется агент в каждом состоянии, т.е. это отношение между набором состояний и набором действий. Состояние $S(t)$ – это некоторая позиция в среде, в которой агент может оказаться с учетом ограничений. Функция вознаграждения определяет качество каждого состояния или пары «состояние – действие». Модель – это представление агента об окружающей среде, с помощью которого агент предсказывает изменение среды [1–2].

Исходя из используемых составляющих алгоритмы обучения с подкреплением можно классифицировать по различным критериям:

1. Политика

Основанные на политиках: алгоритмы, которые обучаются на основе действий, текущих в данной политике: A2C, A3C, PPO и REINFORCE.

Не привязаны к политике: алгоритмы, которые могут обучаться на основе действий, полученных с помощью другой политики: DDPG, DQN, NAF, Q-learning, SAC и TD3.

Другие: для алгоритма Monte Carlo, который может использовать как основанные на политиках, так и наоборот.

2. Пространство действий

Непрерывные: алгоритмы, работающие с непрерывными действиями, включают A2C, A3C, DDPG, NAF, PPO, REINFORCE, SAC, TD3 и TRPO.

Дискретные: алгоритмы, работающие с дискретными действиями, включают DQN, Q-learning, SARSA, SARSA-Лямбда.

3. Пространство состояний

Непрерывные: алгоритмы, которые имеют непрерывное пространство состояний: DDPG, NAF, PPO, REINFORCE, SAC и TD3.

Дискретные: алгоритмы с дискретным пространством состояний: DQN, Monte Carlo, Q-learning, SARSA, SARSA-Лямбда.

4. Оператор

Q-value: алгоритмы, использующие значения Q для обновления политики: DDPG, DQN, Q-learning, Q-learning - Lambda, SAC, SARSA, SARSA - Lambda, TD3.

Advantage: алгоритмы, основанные на преимуществе действия: A2C, A3C, PPO, NAF, TRPO.

Выборочное среднее: используется в Monte Carlo подходах.

5. Класс

Actor-Critic: алгоритмы, сочетающие политику (Actor) и оценку ценности (Critic): A2C, A3C, NAF, PPO, REINFORCE, SAC и TRPO.

Основанные на данных: алгоритмы, основывающиеся преимущественно на оценке ценности: DQN, Monte Carlo, Q-learning, SARSA, SARSA - Lambda, TD3.

Основанные на политиках: метод, основанный на прямом управлении политикой, представлен алгоритмом REINFORCE.

СОЗДАНИЕ ОКРУЖЕНИЯ

Под средой может выступать любая симуляция, которая обрабатывает действия агента и последствия этих действий. На вход поступает действие агента $A(t)$ в состоянии $S(t)$. После обработки получаем переход в следующее состояние $S(t)$ с вознаграждением $R(t+1)$. Вознаграждение $R(t)$ возвращает числовое значение за нахождение агента в том или ином состоянии. Таким образом вознаграждение показывает, насколько данная совокупность ценна. Цель для агента описывается максимизацией прогнозирования кумулятивного вознаграждения. Под действием будем понимать разрешенные перемещения в конкретной среде [3].

Траектория представляет собой весовые коэффициенты в наборе всех допустимых в каждый момент времени t с учетом контекста окружения:

$$A_t = [A_{t,1}, A_{t,2}, \dots, A_{t,M}]^T \quad \forall A_t \in R^M$$

$$\sum_{i=1}^M A_{i,t} = 1$$

$$0 \leq A_{i,t} \leq 1 \quad \forall i, t,$$

где i – одна из возможных траекторий.

Для достижения цели по направлению агента к заданной точке в трехмерной симуляции с учетом обхода препятствий был разработан симулятор маршрута [4]. Он состоит из модульных сегментов, которые могут случайным образом комбинироваться в ходе каждой тренировки. Генерация случайных маршрутов является необходимой для предотвращения обучения агента исключительно одному конкретному маршруту в процессе дальнейших тренировок [5].

Для создания виртуального окружения использовался симулятор MATSim [6]. Данный симулятор является открытым, что позволяет дописывать необходимые модули для проведения исследований. К преимуществам данного симулятора можно отнести: возможность создания большого числа агентов, работа с большими картами с высокой степенью детализации, моделирования различных типов транспорта и загрузки ранее полученных результатов моделирования.

Все эксперименты проводились на вычислительном сервере МТУСИ, который имеет следующие характеристики: CPU AMD EPYC 7742, 64 ядра, 128 потоков, GPU 8 x NVIDIA Tesla A100-SXM4-40GB, RAM 16 x Samsung DDR4 32 GB 3200 MT/s.

Исследуемая конфигурация представляет собой дискретное поле с сеточной структурой, на котором располагаются элементы трассировки. Выделяются три категории элементов: начальный, угловой и прямой блоки. Процедура генерации карты инициируется установкой стартового блока, который позиционируется в одном из четырех направлений: вверх, вправо, вниз или влево. В процессе генерации к стартовому блоку последовательно присоединяются случайным образом выбранные блоки из доступных категорий. Эта процедура продолжается итерационно, до того момента, пока трассировка либо не замкнется, либо не достигнет предустановленного количества элементов.

В процессе формирования трассы каждое последующее звено и его ориентация определяются случайным образом, однако при этом соблюдается условие, что генеральный план должен напоминать непрерывную дорогу. Для этого первоначально создается список блоков, каждый из которых содержит информацию о направлениях входа и выхода. На основе этих данных выполняются вставка и вращение визуальных образов блоков.

После достижения агентом всех заданных целей на трассе инициируется генерация новой карты. В случае столкновения агента с физическим барьером он перемещается в инициальную позицию на трассе, а все цели восстанавливаются. С целью предотвращения избыточного времени простоя агента внедрен 30-секундный таймер. По истечении этого времени симуляция запускается заново. Обнуление таймера производится исключительно при достижении агентом ближайшей цели.

В ходе исследования было выявлено, что имеющиеся стимулы оказались недостаточно эффективными, так как агент испытывал затруднения в понимании предписанных действий в отсутствие прямого достижения цели. Для повышения ясности и эффективности стимулирующей структуры системы были внедрены дополнительные штрафные и входные механизмы:

- Уменьшение расстояния между агентом и ближайшей целью сопровождалось применением штрафа в размере 0,05 балла.
- Увеличение расстояния до цели влекло за собой применение отрицательного штрафа, равного -0,05 балла.
- В систему входных данных был интегрирован вектор, отражающий расстояние до ближайшей цели, что служило дополнительным ориентиром для агента.

Была произведена модификация мишеней с целью обеспечения их видимости в виде отчетливых прямоугольных форм, расположенных на каждом элементе трассы, что способствует четкой идентификации корректных точек входа. Кроме того, была разработана и внедрена дополнительная функциональность, обеспечивающая ротацию целевых объектов на поворотных участках дороги, с целью их ориентации под оптимальным углом в 45 градусов относительно блока поворота.

Сценарный модуль агента включает в себя код, предназначенный для выполнения симуляции. В данном модуле устанавливаются условия, при которых агент получает стимулы для выполнения конкретных действий, а также определяется последовательность операций в рамках симуляционного процесса. С целью интенсификации процесса обучения на начальных этапах была применена методология симуляционного обучения. Для реализации этого подхода была создана демонстрационная версия, состоящая из ряда тестовых испытаний.

ВЫБОР БАЗОВОЙ МОДЕЛИ ОБУЧЕНИЯ

Существуют четыре ключевых подхода к обучению с подкреплением: динамическое программирование, методы Монте-Карло, методы временной разницы и методы градиента политики. Динамическое программирование представляет собой двухэтапный процесс, применяющий уравнение Беллмана для оптимизации политики после проведения ее оценки [7]. Этот метод находит применение в случаях, когда модель среды заранее известна в полном объеме.

Методы Монте-Карло, напротив, изучают опыт эпизодов без учета динамики среды, вычисляя наблюдаемый средний выигрыш как приближенную оценку прогнозируемой траектории. Таким образом, обучение возможно только по завершении всех эпизодов [8–9].

Методы временной разницы обучаются на незавершенных эпизодах, используя бутстреппинг для оценки выигрыша, что делает их своеобразным гибридом динамического программирования и методов Монте-Карло. В отличие от методов временной разницы, которые полагаются на оценку выигрыша для выбора оптимальной политики, методы градиента политики исходят непосредственно из оценки самой политики.

Обучение политике может происходить как с использованием текущей политики (on-policy), так и вне ее пределов (off-policy). В случае on-policy обучения агенты анализируют ту же политику, которая привела к выполнению действия, тогда как в off-policy обучении агенты рассматривают политику, которая может не совпадать с той, которая непосредственно используется [10].

Выбор агентов для обучения с подкреплением (RL) осуществлялся на основе трех ключевых критериев. Во-первых, агент RL должен быть безмодельным, так как данная работа акцентирует внимание на методах безмодельного обучения. Во-вторых, выбранный агент должен быть ранее использован в аналогичных исследованиях, зафиксированных в научной литературе. В-третьих, агент должен поддерживать непрерывные пространства действий и состояний.

В итоге в данной работе для исследования были выбраны два агента: PPO и SAC.

Proximal Policy Optimization (PPO) – это набор алгоритмов, применяемых в обучении с подкреплением без использования модели. Алгоритмы PPO являются методами политико-градиентного типа, что означает, что они осуществляют поиск в пространстве политик, а не присваивают значения парам «состояние – действие». PPO обладает преимуществами алгоритмов оптимизации политики доверительного региона (TRIPOD), но при этом они проще в реализации, более универсальны и имеют лучшую сложность выборки [11]. PPO использует нейронные сети для аппроксимации идеальных функций, которые сопоставляют наблюдения агента с оптимальными действиями в данных состояниях [12].

Soft-Actor Critic (SAC) работает в режиме off-policy, что позволяет ему обучаться на основе опыта, накопленного в прошлом [13]. Накопленный опыт помещается в буфер воспроизведения и используется случайным образом во время тренировок. Это делает

SAC значительно более эффективным с точки зрения выборки, часто требуя в 5–10 раз меньше данных для выполнения той же задачи, что и PPO. Однако SAC обычно требует больших обновлений модели. SAC является оптимальным выбором для более сложных или медленных условий (примерно 0,1 секунды на шаг или более) [14]. Также SAC работает по принципу «максимальной энтропии», что позволяет проводить исследования более естественным образом.

ОБУЧЕНИЕ МОДЕЛИ НА БАЗЕ СЕНСОРОВ

В начальной версии обучающего алгоритма применяется компонент, имитирующий работу лидара. Данный компонент представляет собой датчик, который поддерживает наблюдения на основе излучения лучей, исходящих из центральной точки агента. Этот датчик способен фиксировать расстояния до окружающих объектов, обеспечивая тем самым расширенное восприятие окружающей среды [15].

В процессе обучения были выявлены различные проблемы, одной из которых стало то, что агент на некоторых участках трассы не мог продвигаться дальше из-за частых столкновений с барьерами на поворотах после достижения цели на длинном прямом участке. Основной причиной этого было превышение скорости агентом, что препятствовало своевременной остановке на повороте, так как барьеры оставались вне поля зрения из-за нахождения цели на их пути. Для решения данной проблемы в агенте был добавлен дублирующий компонент сенсора, в результате чего каждый сенсор специализировался на взаимодействии с конкретным типом объектов, также была увеличена дальность их действия. Таким образом, один сенсор отслеживал исключительно барьеры, в то время как другой – только цели, и оба сенсора обеспечивали более дальнюю видимость.

Это изменение позволило устранить проблему на поворотах после разгона, так как каждый сенсор функционировал независимо, предотвращая возникновение слепых зон. Однако это вызвало новый эффект: сенсор, взаимодействующий с целями, начал подмечать цели за барьерами, что иногда приводило к намеренным столкновениям агента с препятствиями в попытке достичь цели на соседних участках трассы. Для устранения этой проблемы было решено визуализировать только одну цель за раз. Переключение между целями реализовывалось по мере прохождения трассы.

На начальном этапе агент демонстрировал произвольные действия, исследуя окружающую среду, – это можно охарактеризовать как фазу исследования. Под влиянием стимулов агент начинал постепенно осознавать, что его основной задачей является приближение к целям и избегание препятствий, хотя этот процесс обучения происходил довольно медленно.

Были замечены случаи, когда агент застревал на определенных участках трассы, а также, овладев навыками на одной трассе, испытывал затруднения на другой, в нетипичных для него ситуациях. Это обусловлено тем, что агент привыкал к элементам одного маршрута и, попадая в неизвестные условия, не сразу находил оптимальную стратегию действий, что можно отнести к явлению переобучения. Однако данное явление не представляет собой серьезной проблемы, требующей внешнего вмешательства, так как при предоставлении агенту большего количества времени на тренировку он самостоятельно преодолевает подобные препятствия.

В ходе применения имитационного обучения агент не демонстрировал мгновенное выполнение маршрута. Поведение агента стало более уверенным, и благодаря интеграции имитационного моделирования с традиционным подходом обучения действия агента были

более эффективными. При соответствующей настройке интенсивности воздействия имитационного компонента положительные результаты становились очевидными. Даже при ограниченном времени на обучение, эквивалентном 250 000 действиям, наблюдалась значительная разница в скорости освоения заданий. В частности, в рамках стандартного обучения с подкреплением агент мог не завершить ни одного маршрута. Однако при использовании имитационного обучения агент демонстрировал способность прохождения нескольких трасс, достигая до 17 маршрутов в установленные временные рамки.

Для сравнения результатов была составлена таблица 1 по каждому из агентов. В таблице представлены результаты обучения агентов по взаимодействию со средой. Основные параметры – это кумулятивная награда и длина эпизода.

Таблица 1. / Table 1.

Epochs	Cumulative reward (PPO)	Cumulative reward (SAC)	Episode length (PPO)	Episode length (SAC)
0k	0	0	1600	1600
40k	2	1	1400	1500
80k	5	3	1200	1300
120k	7	6	1000	1100
160k	8	7	900	1000
200k	10	9	800	900

Метрика кумулятивной награды демонстрирует способность агента принимать эффективные решения в процессе обучения. Награда служит индикатором успешности выполнения задач агентом. Данный параметр при обучении агента PPO постепенно увеличивается, что свидетельствует об улучшении стратегии агента. На последних этапах обучения (160k до 200k) награда достигает максимума.

Показатели длины эпизода указывают, сколько шагов необходимо агенту для завершения эпизода. На ранних этапах обучения (0k – 80k) длина эпизода была высокой, но постепенно снижается, что показывает адаптацию агента к среде. К 200k шагам длина стабилизируется на уровне 800–900 шагов, демонстрируя, что агент научился эффективно достигать целей.

Исходя из данных, можно сделать вывод, что агент успешно адаптируется к условиям обучения, улучшая производительность и взаимодействие с окружающей средой. Также были получены данные, показывающие динамику потерь в процессе обучения агента. Эти данные подчеркивают прогресс агента и его взаимодействие с окружающей средой.

Как следует из данных, представленных в таблице 2, показатель GAIL Loss (потери, связанные с методом Generalized Adversarial Imitation Learning [16]) демонстрирует устойчивую тенденцию к снижению. На начальном этапе обучения потери составляли 1.10, однако к 200 тысячам итераций этот показатель снизился до 0.60. Такая динамика свидетельствует о том, что агент успешно адаптируется к среде и постепенно улучшает свои стратегии, минимизируя ошибки в процессе обучения.

Таблица 2. / Table 2.

Epochs	GAIL Loss (PPO)	Policy Loss (PPO)	Pretraining Loss (PPO)	Value Loss (PPO)
0k	1.10	0.20	0.75	60
40k	0.90	0.18	0.70	45
80k	0.80	0.15	0.65	30
120k	0.75	0.12	0.60	25
160k	0.65	0.05	0.56	20
200k	0.60	0.04	0.55	19

Параметр Policy Loss, отражающий потери, связанные с политикой агента, также показывает значительное улучшение. На начальных этапах обучения значение данного параметра составляло 0.20, однако к концу обучения оно снизилось до 0.04. Это указывает на эффективную оптимизацию процесса принятия решений агентом, что подтверждает его способность корректировать свои действия в соответствии с изменяющимися условиями среды.

Показатель Pretraining Loss, характеризующий потери на этапе предобучения, также демонстрирует положительную динамику. Исходное значение данного параметра составляло 0.75, однако к завершению обучения оно снизилось до 0.55. Это свидетельствует о том, что процесс предобучения был успешно завершен, и агент смог эффективно использовать полученные на этом этапе знания для дальнейшего обучения.

Наиболее заметное улучшение наблюдается в параметре Value Loss, который отражает потери, связанные с оценкой ценности действий агента. На начальном этапе обучения значение этого параметра составляло 60, однако к 200 тысячам итераций оно снизилось до 19. Такое резкое снижение указывает на значительное улучшение способности агента оценивать ценность своих действий, что является ключевым фактором для повышения эффективности его стратегий.

Таким образом, анализ представленных данных позволяет сделать вывод, что использование метода GAIL способствует значительному улучшению показателей обучения агента. Снижение потерь по всем ключевым параметрам (GAIL Loss, Policy Loss, Pretraining Loss и Value Loss) подтверждает эффективность данного подхода для оптимизации стратегий агента в заданной среде.

В таблице 3 представлены данные о политике обучения агента, на основании которых можно судить о производительности подхода. Представленные метрики помогают оценить прогресс агента и его адаптацию к динамичной среде.

Исследование динамики изменения ключевых параметров в процессе обучения интеллектуального агента выявляет ряд значительных трендов, указывающих на повышающуюся эффективность его стратегий и общую продуктивность. Детальный анализ данных позволяет заключить, что позитивные изменения отражаются на стабильности и детерминированности принимаемых агентом решений.

Первое внимание заслуживает коэффициент бета, который демонстрирует последовательное снижение. Этот факт указывает на уменьшение стохастичности в выборе агентом действий. По мере завершения процесса обучения данный коэффициент приближается к

значению 1.50, что свидетельствует о переходе агента к более систематизированному подходу в принятии решений. Это можно интерпретировать как успешное уменьшение случайных колебаний в действиях агента, что способствует оптимизации его стратегий.

Таблица 3. / Table 3.

Epochs	Beta (PPO)	Entropy (PPO)	Epsilon (PPO)	Extrinsic Reward (PPO)	Extrinsic Value Estimate (PPO)	GAIL Expert Estimate (PPO)
0k	4.40	2.10	0.20	0	0	0.60
20k	3.80	1.90	0.18	0.50	0.40	0.65
40k	3.50	1.60	0.16	0.80	0.60	0.70
60k	3.00	1.30	0.14	1.00	0.75	0.75
80k	2.50	1.20	0.12	1.50	0.80	0.75
100k	2.00	1.15	0.10	1.70	0.85	0.80
120k	1.80	1.00	0.08	1.80	0.70	0.85
140k	1.70	0.90	0.06	1.90	0.60	0.85
160k	1.60	0.80	0.05	2.00	0.65	0.90
180k	1.50	0.70	0.05	2.10	0.72	0.92

Энтропия является еще одним ключевым показателем, и ее динамика показывает уменьшение. Это указывает на возрастание уверенности агента в выборе оптимальных стратегий и сокращение неопределенности в его действиях. Данные изменения подтверждают гипотезу о том, что процесс обучения позволяет формировать у агента устойчивые и повторяемые стратегии поведения.

Параметр эпсилон, отражающий степень случайности в действиях, также снижается, достигая значения 0.05 к финалу обучения. Такое развитие событий указывает на уменьшение доли случайных решений и рост надежности стратегий, выбираемых агентом. Агент все менее зависим от случайного выбора и все более полагается на усвоенные стратегии, что свидетельствует об успехах в обучении.

Параметр внешних наград показывает устойчивую положительную динамику в течение всего процесса обучения, означая, что агент эффективно решает поставленные задачи и постепенно повышает свою результативность. Рост внешних наград демонстрирует, что агент не только приспосабливается к окружающей среде, но и активно улучшает свои показатели.

Параметры внешней ценности, отражающие успешность оценки агентом собственной деятельности, также демонстрируют положительную динамику, подтверждая, что обучение положительно влияет на его способности оценивать ценность собственных действий.

Наконец, оценка эксперта, основанная на методике GAIL, показывает, что агент все более точно и успешно воспроизводит экспертные стратегии. Это говорит о том, что процесс обучения приближает его поведенческие паттерны к экспертным, что является ключевым показателем успеха.

В заключение отметим, что приведенный анализ ключевых параметров подтверждает успешность обучения агента, которое способствует значительному улучшению его стратегической эффективности. Снижение стохастичности в деле, увеличение уверенности, рост внешних наград и развитие способностей по имитации экспертного поведения демонстрируют, что агент активно адаптируется к среде и достигает возрастания производительности.

На основе данного анализа можно утверждать, что агент, оснащенный лучевым сенсором, демонстрирует наивысшую результативность в выполнении поставленных задач. В экспериментальных условиях, при использовании PPO с лимитом в 200 000 итераций, данный агент успешно преодолел около 20 трасс, что значительно превосходит результаты, полученные при использовании SAC.

МОДЕЛЬ НА ОСНОВЕ СЕТОЧНЫХ СЕНСОРОВ

В данной симуляции в качестве ключевого сенсорного элемента использовался модуль для распознавания двух категорий объектов: преграды и целевые точки. Визуальная идентификация на сетке осуществлялась через цветовое кодирование: цели выделялись зеленым, а барьеры – красным цветом. Сенсорная матрица обладает размерностью 20x20 ячеек, каждая из которых составляет 0.5 условных единиц. Это сеточное покрытие обеспечивает агенту анализ и восприятие окружающих объектов [17].

При внешнем мониторинге обучающей динамики отмечены значительные трудности, возникшие у агента в процессе освоения задачи. Возможные причины могут включать неэффективные начальные параметры конфигурации или недостаточную продолжительность тренировочного периода. Для улучшения результатов необходимо провести дальнейшие эксперименты, включающие коррекцию гиперпараметров и увеличение времени обучения.

Таблица 4 содержит результаты применения алгоритмов PPO и SAC, что позволяет оценить их эффективность и определить направления для оптимизации.

Таблица 4. / Table 4.

Epochs	Cumulative Reward (PPO)	Cumulative Reward (SAC)	Episode Length (PPO)	Episode Length (SAC)
0k	0	0	1800	1800
20k	2	1.5	1600	1700
40k	3	2.0	1400	1500
60k	6	3.0	1200	1300
80k	7	4.5	1000	1100
100k	10	5.0	800	1000
120k	12	6.0	600	900
140k	14	8.0	500	700
160k	15	10.0	400	600
180k	16	12.0	300	500

Анализ динамики параметра кумулятивной награды для алгоритма PPO демонстрирует устойчивый рост от начального значения, близкого к нулю, до 16 единиц к завершению обучения. Такая положительная динамика свидетельствует о постепенном улучшении навыков агента и его способности эффективно взаимодействовать с окружающей средой. В то же время, для алгоритма SAC также наблюдается увеличение кумулятивной награды, однако его результаты являются менее выраженными по сравнению с PPO, что может указывать на различия в эффективности данных методов в контексте поставленной задачи.

Для алгоритма PPO длина эпизодов сократилась с 1800 до 300 шагов, что свидетельствует о значительном повышении эффективности агента. Уменьшение продолжительности эпизодов, сопровождаемое ростом кумулятивной награды, подтверждает оптимизацию стратегии агента и его способность быстрее достигать целевых состояний. Это указывает на то, что агент не только улучшает свои навыки, но и становится более рациональным в использовании ресурсов и времени. Таким образом, оба алгоритма – PPO и SAC – демонстрируют успешную адаптацию к среде и стабильный прогресс в процессе обучения. Однако PPO показал себя лучше, с связи с чем далее будем приводить анализ по данному алгоритму. Результаты мониторинга поведения агента представлены в таблице 5.

Таблица 5. / Table 5.

Epochs	GAIL Loss (PPO)	Policy Loss (PPO)	Pretraining Loss (PPO)	Value Loss (PPO)
0k	0.50	0.052	0.85	70
20k	0.45	0.051	0.78	50
40k	0.40	0.050	0.69	30
60k	0.35	0.055	0.60	25
80k	0.30	0.049	0.55	20
100k	0.25	0.047	0.50	18
120k	0.20	0.045	0.48	15
140k	0.15	0.046	0.40	14
160k	0.10	0.040	0.30	12
180k	0.05	0.039	0.20	10

Анализ динамики изменения параметра GAIL Loss указывает на недостаточную эффективность текущей процедуры клонирования поведения. Наблюдаемое незначительное снижение уровня потерь свидетельствует о том, что модель не способна точно воспроизводить экспертные стратегии. Это указывает на необходимость пересмотра подхода к обучению, поскольку текущая конфигурация не достигает достаточно высокой точности в имитации целевого поведения.

Параметр Policy Loss, связанный с потерями агента при реализации стратегии, практически не изменяется на протяжении всего обучения. Такая стагнация предполагает, что агент не способен адаптировать свои стратегии, возможно, из-за недостаточной гибкости модели или неоптимальных гиперпараметров. Это подчеркивает необходимость тщательной настройки алгоритма для улучшения процессов обучения.

Value Loss, отвечающий за потери, связанные с оценкой ценности действий, также демонстрирует неидеальное поведение. Хотя на начальных этапах обучения можно наблюдать ожидаемый рост потерь, далее происходит их увеличение после краткосрочного снижения, что противоречит ожидаемым тенденциям. Такая динамика свидетельствует о неспособности модели точно прогнозировать будущие действия, что может быть вызвано ограничениями архитектуры или недостаточным объемом обучающих данных.

В общем выявленные аномалии в динамике параметров потерь подчеркивают необходимость пересмотра методов обучения. Для достижения более устойчивых и прогнозируе-

мых результатов требуется провести углубленные исследования, направленные на оптимизацию гиперпараметров, совершенствование архитектуры модели и увеличение объема данных. Лишь при устранении этих недостатков возможно значительное улучшение эффективности и точности модели.

Анализ результатов симуляции, в которой использовались сеточные сенсоры, показал неудовлетворительные показатели. Это может быть связано либо с неэффективностью сенсорного компонента, либо с недостаточным качеством данных демонстрационной версии, используемой для имитации. Низкая результативность объясняется ограниченной способностью сеточных сенсоров точно распознавать и интерпретировать важные элементы окружающей среды, что ведет к неоптимальным стратегиям. Также возможная причина заключается в недостаточной репрезентативности предоставленных данных, что отрицательно сказывается на процессе обучения.

Для повышения эффективности обучения целесообразно пересмотреть методы и параметры, включая модификацию архитектуры сенсоров, оптимизацию гиперпараметров обучения и улучшение качества демонстрационных данных. Дальнейшие исследования могут выявить более продуктивные подходы к обучению, что позволит улучшить производительность агента в решении поставленных задач.

МОДЕЛЬ НА БАЗЕ ВИЗУАЛЬНЫХ СЕНСОРОВ

На завершающем этапе эксперимента интеграция визуального сенсора сыграла ключевую роль, обеспечивая восприятие окружающей среды путем обработки изображений [18]. Входные изображения были установлены с разрешением 32×32 пикселя как минимально возможным, чтобы сохранить различимость ключевых образов при минимизации вычислительной нагрузки. Такое уменьшение размера было необходимо из-за значительной ресурсоемкости обработки визуальных данных, которая экспоненциально возрастает с увеличением разрешения.

Экспериментальные условия предполагали обучение агента только с использованием алгоритма PPO. SAC, напротив, не демонстрировал необходимой эффективности. Это может быть обусловлено тем, что для SAC требуется более тонкая настройка гиперпараметров или же значительные вычислительные мощности для достижения аналогичных с PPO результатов.

Применение визуального сенсора с низким разрешением дало возможность сократить вычислительные затраты, сохраняя при этом способность агента распознавать главные объекты окружающей среды. Однако недостигнутая эффективность агента SAC говорит о необходимости продолжения исследований в области оптимизации алгоритмов для работы с визуальными данными.

Результаты эксперимента хотя и уступают показателям лучевых сенсоров, но превышают эффективность системы с сеточными сенсорами. Процесс обучения успешно проходил даже при ограниченном разрешении сенсора, демонстрируя адаптационные способности агента к работе с недостатком данных, что подтверждает перспективность визуальных сенсоров в этой сфере.

Таблицы 6 и 7 представляют ключевые метрики процесса обучения, служащие базой для сравнительной оценки влияния разных типов сенсоров на эффективность модели.

Исходя из данных применение визуального сенсора показало свою применимость и перспективы для дальнейших исследований и оптимизации обучения, несмотря на ограничение разрешения.

Таблица 6. / Table 6.

Epochs	Cumulative Reward	Episode Length
0k	6	1800
20k	8	1750
40k	10	1600
60k	12	1500
80k	14	1400
100k	16	1300
120k	17	1400
140k	15	1600
160k	18	1550
180k	18	1350

Policy Loss устойчиво снижается, подтверждая успешную оптимизацию стратегии агента и его адаптацию к среде. Value Loss демонстрирует колебания: первоначальный рост сменяется временным снижением и последующим увеличением, что указывает на возможные ошибки в прогнозировании будущих состояний, вероятно, из-за ограничений архитектуры сети или недостатка обучения. Entropy постепенно падает, отражая повышение уверенности агента в принимаемых решениях. Extrinsic Reward стабильно растет, подтверждая улучшение общей производительности. Несмотря на проблемы с нестабильностью Value Loss, система показывает признаки эффективного обучения. Для ускорения прогресса и стабилизации результатов, возможно, потребуются дополнительная настройка гиперпараметров или увеличение длительности тренировки.

Таблица 7. / Table 7.

Epochs	Beta	Entropy	Epsilon	Extrinsic Reward	Extrinsic Value Estimate	GAIL Expert Estimate
0k	4.50	2.15	0.20	0	0.30	0.40
20k	4.00	1.90	0.18	3	0.25	0.45
40k	3.80	1.75	0.16	5	0.28	0.50
60k	3.50	1.50	0.14	7	0.40	0.55
80k	3.00	1.30	0.12	10	0.50	0.60
100k	2.50	1.10	0.10	12	0.55	0.65
120k	2.00	0.90	0.08	14	0.60	0.70
140k	1.80	0.75	0.05	15	0.65	0.75
160k	1.60	0.60	0.05	16	0.67	0.80
180k	1.50	0.50	0.04	18	0.70	0.85

Эксперимент подтвердил трудности работы с визуальными сенсорами, увеличив время обучения и вызвав технические проблемы. Однако, несмотря на низкое разрешение сенсоров и временные ограничения, агент успешно справился с задачами на пяти трассах, частично адаптировавшись к среде и освоив базовые стратегии. Результаты показывают, что даже при субоптимальных параметрах агент способен развиваться, открывая перспективы для дальнейших исследований по улучшению разрешения, увеличению времени обучения и тонкой настройке гиперпараметров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование посвящено оценке эффективности методов обучения с подкреплением для выбора оптимальных траекторий автономных транспортных средств. Основное внимание уделено сравнению трех типов сенсоров – лучевых, сеточных и визуальных – и их влиянию на обучение агентов, учитывая преимущества и ограничения каждого из них.

Лучевые сенсоры показали наилучшие результаты, пройдя около 20 трасс благодаря высокой точности и дальности обнаружения объектов, что улучшило навигацию и предотвратило столкновения, несмотря на повышенные вычислительные затраты. Сеточные сенсоры оказались наименее эффективными из-за низкой точности и слабой адаптивности, несмотря на простоту и низкие ресурсные требования. Визуальные сенсоры заняли среднее положение, пройдя около пяти трасс, что свидетельствует о потенциальной перспективности при улучшении алгоритмов и увеличении разрешения, несмотря на высокую вычислительную сложность.

Анализ метрик показал улучшение стратегий агентов с лучевыми и визуальными сенсорами в отличие от сеточных, где наблюдались значительные колебания, требующие дальнейшей оптимизации. Рекомендуются продлить обучение для сеточных и визуальных сенсоров, чтобы снизить риск переобучения и улучшить адаптацию. Планируются дополнительные исследования по настройке гиперпараметров и тестированию более сложных архитектур нейронных сетей, таких как трансформеры или графовые сети, для обработки данных от разнородных сенсоров. Комбинирование различных сенсоров может повысить точность систем автоматического управления за счет улучшения восприятия окружения.

Обучение с подкреплением открывает перспективы для управления автономным транспортом, но требует оптимизации с учетом вычислительных ресурсов и качества данных. Результаты закладывают фундамент для дальнейшего развития технологий автономного вождения и систем помощи водителю.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Zhang S., Xia Q., Chen M., Cheng S. Multi-Objective Optimal Trajectory Planning for Robotic Arms Using Deep Reinforcement Learning. *Sensors*. 2023. Vol. 23. P. 5974. DOI: 10.3390/s23135974
2. Tamizi M.G., Yaghoubi M., Najjaran H. A review of recent trend in motion planning of industrial robots. *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*. 2023. Vol. 7. Pp. 253–274. DOI:10.1007/s41315-023-00274-2

3. Kollar T., Roy N. Trajectory Optimization using Reinforcement Learning for Map Exploration. *International Journal of Robotics Research*. 2008. Vol. 27. No. 2. Pp. 175–196. DOI: 10.1177/0278364907087426
4. Acar E.U., Choset H., Zhang Y., Schervish M. Path planning for robotic demining: robust sensor-based coverage of unstructured environments and probabilistic methods. *International Journal of Robotics Research*. 2003. Vol. 22. No. 7–8. Pp. 441–466.
5. Cohn D.A., Ghahramani Z., Jordan M.I. Active learning with statistical models. *Journal of Artificial Intelligence Research*. 1996. No. 4. Pp. 705–712.
6. Axhausen K. et al. Introducing MATSim. In: Horni, A et al (eds.). *Multi-Agent Transport Simulation MATSim*. London: Ubiquity Press. 2016. Pp. 3–8. DOI: 10.5334/baw.1
7. Wu G., Zhang D., Miao Z., Bao W., Cao J. How to Design Reinforcement Learning Methods for the Edge: An Integrated Approach toward Intelligent Decision Making. *Electronics*. 2024. Vol. 13. P. 1281. DOI: 10.3390/electronics13071281
8. Zhou T., Lin M. Deadline-aware deep-recurrent-q-network governor for smart energy saving. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*. 2021. Vol. 9. Pp. 3886–3895. DOI: 10.1109/TNSE.2021.3123280
9. Yang Y., Wang J. An overview of multi-agent reinforcement learning from game theoretical perspective. arXiv 2020, arXiv:2011.00583. DOI: 10.48550/arXiv.2011.00583
10. Mazyavkina N., Sviridov S., Ivanov S., Burnaev E. Reinforcement learning for combinatorial optimization: A survey. *Comput. Oper. Res.* 2021. Vol. 134. P. 105400. DOI: 10.1016/j.cor.2021.105400
11. Junwei Zhang, Zhenghao Zhang, Shuai Han, Shuai Lü, Proximal policy optimization via enhanced exploration efficiency. *Information Sciences*. 2022. Vol. 609. Pp. 750–765. ISSN 0020-0255. DOI: 10.1016/j.ins.2022.07.111
12. Hessel M., Modayil J., H. van Hasselt, Schaul T. et al. Rainbow: Combining improvements in deep reinforcement learning. In *AAAI Conference on Artificial Intelligence*. 2018. Pp. 3215–3222. DOI: 10.1609/aaai.v32i1.11796
13. Haarnoja T., Zhou A., Abbeel P., Levine S. Soft actor-critic: Off-policy maximum entropy deep reinforcement learning with a stochastic actor. In *International Conference on Machine Learning*. 2018. Pp. 1856–1865. DOI: 10.48550/arXiv.1801.01290
14. Lillicrap T.P., Hunt J.J., Pritzel A. et al. Continuous control with deep reinforcement learning. arXiv:1509.02971v1. 2015. file:///C:/Users/%D0%90%D1%80%D1%81%D0%B5%D0%BD/Downloads/1509.02971v1.pdf
15. Chen Y., Lam C.T., Pau G., Ke W. From Virtual to Reality: A Deep Reinforcement Learning Solution to Implement Autonomous Driving with 3D-LiDAR. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15. No. 3. P. 1423. DOI: 10.3390/app15031423
16. Guoyu Zuo, Kexin Chen, Jiahao Lu, Xiangsheng Huang. Deterministic generative adversarial imitation learning. *Neurocomputing*. 2020. Vol. 388. Pp. 60–69. ISSN 0925-2312. DOI: 10.1016/j.neucom.2020.01.016
17. Sawada R. Automatic Collision Avoidance Using Deep Reinforcement Learning with Grid Sensor. In: Sato, H., Iwanaga, S., Ishii, A. (eds). *Proceedings of the 23rd Asia Pacific Symposium on Intelligent and Evolutionary Systems*. IES 2019. Proceedings in Adaptation, Learning and Optimization. Springer, Cham. 2020. Vol. 12. Pp. 17–32. DOI: 10.1007/978-3-030-37442-6_3

18. Hachaj T., Piekarczyk M. On Explainability of Reinforcement Learning-Based Machine Learning Agents Trained with Proximal Policy Optimization That Utilizes Visual Sensor Data. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15. No. 2. P. 538. DOI: 10.3390/app15020538

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторе

Городничев Михаил Геннадьевич, кан. техн. наук, доцент, декан факультета «Информационные технологии», Московский технический университет связи и информатики;

111024, Россия, Москва, ул. Авиамоторная, 8А;

m.g.gorodnichev@mtuci.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1739-9831>, SPIN-код: 4576-9642

Information about the author

Mikhail G. Gorodnichev, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Dean of the Faculty of Information Technology, Moscow Technical University of Communications and Informatics;

111024, Russia, Moscow, 8A Aviamotornaya street;

m.g.gorodnichev@mtuci.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1739-9831>, SPIN-code: 4576-9642

УДК 004.853

Научная статья

DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-2-103-112

EDN: PFILQX

Модели и методы глубокого обучения в задачах распознавания и классификации медицинских изображений

И. А. Пшенокова^{✉1,2}, М. Р. Киясов²

¹Институт информатики и проблем регионального управления –
филиал Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук
360000, Россия, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а

²Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х. М. Бербекова
360004, Россия, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173

Аннотация. В работе проведены исследование и анализ моделей и методов глубокого обучения в задачах распознавания и классификации изображений опухолей мозга. Для сравнения эффективности наиболее актуальных и доступных моделей на основе сверточных нейронных сетей были выбраны модели VGG19, Xception и ResNet152. Наилучшие результаты показала модель Xception. Целью данной работы являются оптимизация и обучение выбранной модели с помощью различных методов для повышения точности диагностики опухолей головного мозга человека. Предложена и реализована стратегия для улучшения этой модели с использованием методов переноса обучения и аугментации данных. Из проведенных тестов следует, что улучшенная модель демонстрирует более высокую точность и устойчивость к различным видам искажений данных, что делает ее более эффективной для задач распознавания и классификации изображений.

Ключевые слова: методы распознавания изображений, методы глубокого обучения, сверточные нейронные сети, методы переноса обучения

Поступила 14.03.2025, одобрена после рецензирования 07.04.2025, принята к публикации 09.04.2025

Для цитирования. Пшенокова И. А., Киясов М. Р. Модели и методы глубокого обучения в задачах распознавания и классификации медицинских изображений // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2025. Т. 27. № 2. С. 103–112. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-2-103-112

MSC: 68T42

Original article

Models and methods of deep learning in medical image recognition and classification tasks

I.A. Pshenokova^{✉1,2}, M.R. Kiyasov²

¹Institute of Computer Science and Problems of Regional Management –
branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
360000, Russia, Nalchik, 37-a I. Armand street

²Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov
360004, Russia, Nalchik, 173 Chernyshevsky street

Abstract. The paper presents a study and analysis of deep learning models and methods in the problems of recognition and classification of brain tumor images. To compare the effectiveness of the most relevant and available models based on convolutional neural networks, the VGG19, Xception,

and ResNet152 models were selected. The Xception model showed the best results. The purpose of this work is to optimize and train the selected model using various methods to improve the accuracy of diagnosing human brain tumors. A strategy for improving this model using transfer learning and data augmentation methods is proposed and implemented. The tests show that the improved model demonstrates higher accuracy and resistance to various types of data distortions, which makes it more effective for image recognition and classification tasks.

Keywords: image recognition methods, deep learning methods, convolutional neural networks, transfer learning methods

Submitted 14.03.2025,

approved after reviewing 07.04.2025,

accepted for publication 09.04.2025

For citation. Pshenokova I.A., Kiyasov M.R. Models and methods of deep learning in medical image recognition and classification tasks. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2025. Vol. 27. No. 2. Pp. 103–112. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-2-103-112

ВВЕДЕНИЕ

Технологии распознавания и классификации изображений являются неотъемлемой частью многих отраслей экономики, таких как медицина, автомобилестроение, системы безопасности и развлечения. Методы распознавания позволяют автоматизировать такие процессы, как извлечение информации, распознавание объектов и лиц, сжатие изображений, медицинская визуализация, а также повышать их эффективность.

Распознавание изображений – это область компьютерного зрения и машинного обучения, сосредоточенная на идентификации и классификации объектов в изображениях и видео. Поскольку объем визуальной информации растет с каждым годом, необходимо разрабатывать новые или улучшать имеющиеся методы их обработки.

Традиционные методы распознавания изображений включают в себя различные алгоритмы и техники, которые использовались до широкого распространения глубокого обучения. Их можно подразделить на несколько категорий: методы, основанные на извлечении признаков (SIFT, SURF, HOG и LBP), методы классификации (метод опорных векторов, k-means и деревья решений) и классические алгоритмы (гистограммное выравнивание, фильтрация и сегментация). Однако так как эти методы основываются на ручном анализе, они становятся все менее эффективными в условиях больших данных. Актуальность данной работы обусловлена растущими требованиями к автоматизации анализа визуальной информации и необходимостью разработки более современных, точных и устойчивых моделей, способных работать в условиях реального времени и с разнообразными типами данных.

Глубокое обучение и нейронные сети произвели революцию в области распознавания изображений, обеспечивая значительные улучшения в точности и эффективности по сравнению с классическими методами [1]. Основные методы и архитектуры, используемые в этой области, приведены на рисунке 1.



Рис. 1. Методы глубокого обучения в распознавании изображений

Fig. 1. Deep learning methods in image recognition

Как видно из рисунка, существует множество подходов к распознаванию и классификации визуальной информации, однако основными являются сверточные нейронные сети (CNN), которые эффективно обрабатывают изображения благодаря своей архитектуре (рис. 2), позволяющей выявлять пространственные и временные зависимости [2].

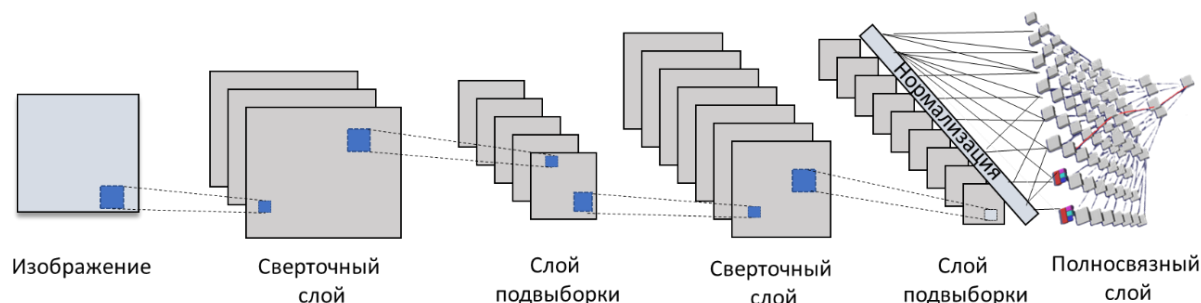


Рис. 2. Архитектура сверточной нейронной сети

Fig. 2. Architecture of a convolutional neural network

Сверточный слой является основным элементом и выполняет свертку входных данных, выделяя важные характеристики изображения на различных уровнях абстракции, такие как края, текстуры или формы. Далее данные поступают на слой подвыборки, который за счет сохранения наиболее значимых признаков уменьшает размерность выходных данных, сокращая при этом вычислительные затраты. Выходы слоя подвыборки нормализуются для каждого пакета данных, что позволяет уменьшить влияние изменений в распределении данных и способствует эффективному и быстрому обучению модели. В завершающей части сети данные передаются в полносвязный слой, где каждый нейрон соединен со всеми нейронами предыдущего слоя. Этот слой отвечает за окончательную классификацию или регрессионный анализ на основе извлеченных признаков.

СВЕРТОЧНЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ ДЛЯ АНАЛИЗА МЕДИЦИНСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Сверточная нейронная сеть является одним из наиболее широко используемых методов в области медицинских изображений, особенно в области анализа медицинских изображений.

Идентификация изображений была одной из первых областей анализа медицинской визуализации. Качественный и количественный анализ изображений, выполненный методами глубокого обучения, играет незаменимую роль в медицинской диагностике для клинической терапии [3, 4]. Кроме того, использование машинного обучения для сегментации медицинских изображений может эффективно помочь врачам подтвердить размер пораженных опухолей, количественно оценить эффект до и после лечения, снизив нагрузку на врачей [5].

Преимущество глубокого обучения, особенно глубоких сверточных сетей [6], заключается в том, что функция ручного сбора данных может быть заменена эффективными алгоритмами неконтролируемого или полуконтролируемого обучения признаков и иерархического извлечения признаков. Так, в работах [7, 8, 9] представлены преимущества сверточных нейронных сетей при диагностике заболеваний на основе классификации и сегментации МРТ- и КТ-изображений головного мозга и рентгеновских изображений легких, в частности, задачи, в которых была изучена диагностическая и прикладная ценность модели глубокого обучения. Методы глубокого обучения обучают модель слиянию с хорошей способностью к обобщению на основе большого объема данных, что может сделать процесс слияния более надежным и преодолеть недостатки ручного выбора функций, такие как дороговизна, трудоемкость и подверженность человеческим ошибкам.

Разница между сверточной нейронной сетью (СНС) и традиционными полносвязными нейронными сетями состоит в способности захватывать корреляционные пространственно-временные зависимости в данных, что позволяет эффективно обрабатывать изображения и выделять локальные особенности [10].

Существует множество моделей сверточных нейронных сетей, широко используемых для решения задач распознавания и классификации медицинских изображений. Так, в [11] представлен алгоритм классификации МРТ мелких сосудов головного мозга с использованием сверточной нейронной сети. В [12] авторы разработали многопоточную глубокую сверточную нейронную сеть для классификации стабильных легких когнитивных нарушений для ранней диагностики болезни Альцгеймера.

Авторы в [13] представили новую модель, которая объединила глубокие сверточные сети с байесовским алгоритмом для прогнозирования и классификации опухолей головного мозга для изображений МРТ.

Интеграция модулей внимания со сверточными сетями представлена в [14] для неиерархического анализа медицинских изображений (задачи оценки деменции, классификация расстройств мозга и классификация опухолей мозга).

В работе [15] разработали новую остаточную нейронную сеть для классификации инсульта. Авторами проведена количественная оценка предложенного метода в трех различных слоях.

В [16] проведены компьютерные исследования эффективности применения методов переноса глубокого обучения для решения задачи распознавания опухолей головного мозга человека на основе его МРТ-снимков. Авторами предложены различные стратегии глубокого обучения и тонкой настройки моделей на основе глубоких сверточных сетей.

В настоящей работе мы рассмотрим наиболее актуальные и доступные СНС, в частности, VGGNet, Xception, и ResNet [17].

VGGNet известна своей глубиной, достигающей до 19 слоев, и использованием сверточных слоев с небольшими фильтрами размером 3×3 . Архитектура акцентирует внимание на простоте и повторяемости структуры, что делает ее удобной для понимания и реализации [18]. Однако из-за своей глубокой структуры VGGNet имеет высокую вероятность переобучения и может демонстрировать длительное время предсказания.

Xception является улучшенной версией Inception и использует глубокие сепарабельные свертки. Эти свертки разбивают стандартную свертку на две части: сначала применяется свертка по глубине (с ядром 1×1), а затем свертка по пространству (с ядром 3×3). Это позволяет значительно уменьшить количество параметров и вычислительные затраты.

ResNet ввела концепцию остаточных соединений, что позволило создавать очень глубокие сети без проблем затухания градиентов [19]. Однако с увеличением количества слоев также возрастает сложность подбора гиперпараметров и требуются значительные вычислительные ресурсы и память для глубоких моделей.

Сравним эффективность этих моделей. Для сравнения были выбраны следующие версии ранее описанных моделей: VGG19, Xception и ResNet152.

Моделям предоставляются изображения, на которых изображены различные виды опухолей мозга, а также изображения, не содержащие опухолей. Эти данные организованы в папки, каждая из которых содержит множество изображений в формате JPG, соответствующих определенным классам: «glioma», «meningioma», «pituitary» и «notumor». Поскольку выбранные модели доступны, достаточно просто импортировать их через соответствующие библиотеки и обучить на тренировочных данных для последующего тестирования. Обучение и тестирование проводились с использованием одинаковых названий папок, но с разным содержимым, которые были взяты с сайта Kaggle [20]. В качестве платформы использовалась Google Colab, так как обучение моделей потребует значительных ресурсов.

Результаты тестирования моделей по классам представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты тестирования моделей VGG19, Xception, ResNet152 по классам

Table 1. Test results of VGG19, Xception, ResNet152 models by classes

Модель	Общее количество изображений	Количество обработанных изображений класса	Процент обнаружений класса
<i>Класс «glioma»</i>			
VGG19	300	157	52,33%
Xception	300	232	77,33%
ResNet152	300	134	44,67%
<i>Класс «meningioma»</i>			
VGG19	306	9	2,94%
Xception	306	180	58,82%
ResNet152	306	115	44,67%
<i>Класс «pituitary»</i>			
VGG19	300	260	86,67%
Xception	300	277	92,33%
ResNet152	300	180	60%
<i>Класс «notumor»</i>			
VGG19	405	369	91,11%
Xception	405	389	96,05%
ResNet152	405	263	64,94%

Из таблицы видно, что модель VGG19 показала средний результат на папке «glioma», но с папкой «meningioma» справилась очень плохо. Однако смогла правильно классифицировать почти все изображения из папки «notumor». С последней папкой модель справилась немного хуже, чем с предыдущей, правильно распознав 260 из 300 фотографий. Модель VGG19 показала наилучший результат на папке «notumor», достигнув 91,11 % точности обнаружения, в то время как наихудший результат был зафиксирован на папке «meningioma» с процентом обнаружения 2,94 %.

Модель Xception показала хороший результат на папке «glioma». На папке «meningioma» модель показала средний результат, правильно распознав почти 60 % изображений. С папкой «notumor» модель справилась почти идеально и показала отличный результат с последней папкой. Модель Xception показала наилучший результат на папке «notumor», достигнув 92,33 % правильного распознавания. Наихудший результат был получен в папке «meningioma» с процентом правильного распознавания 58,82 %.

Модель ResNet152 смогла правильно обнаружить чуть меньше половины изображений из папки «glioma», с папкой «meningioma» модель справилась немного хуже, на папке «notumor» был получен результат немного выше среднего – 64,94 %, и с последней папкой модель справилась немного хуже, чем с предыдущей, распознав 180 изображений из 300. Наилучший результат модель ResNet152 показала с папкой «notumor», достигнув 64,94 % обнаружения, в то время как наихудший результат был зафиксирован с папкой «meningioma» – 37,58 %.

Таким образом, за счет разбивки стандартной свертки на две части по глубине и пространству и значительного уменьшения количества обрабатываемых параметров среди всех моделей лучший процент обнаружений класса показала модель Xception.

Целью данной работы являются оптимизация и обучение выбранной модели с помощью различных методов для повышения точности диагностики опухолей головного мозга человека.

УЛУЧШЕНИЕ МОДЕЛИ РАСПОЗНАВАНИЯ И КЛАССИФИКАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Используем метод переноса обучения в распознавании изображений. В качестве базовой модели классификации будем использовать предобученную модель Xception, в которой заморожены первые 70 слоев. Под операцией заморозки понимается процедура фиксации значений весов сверточных слоев таким образом, что они не будут обновляться во время обучения модели, что позволяет модели лучше адаптироваться к отобранным данным, при этом учитывая информацию, которая была использована на этапе обучения предобученной модели. Остальные слои остаются доступны для обучения на отобранных данных. Далее добавляются новые слои с функцией активации «softmax» с указанием необходимого числа классов, специально предназначенные для обработки изображений на основе имеющихся данных.

Затем модель компилируется с использованием оптимизатора Adam, задается функция потерь categorical_crossentropy и определяется метрика accuracy для оценки точности.

Затем для аугментации данных используем ImageDataGenerator. В этом объекте задаются различные параметры аугментации, такие как изменение масштаба, вращение, сдвиги по ширине и высоте, сдвиг по углу, масштабирование и горизонтальное отражение изображений. Эти методы помогают модели лучше обрабатывать изображения и улучшают ее способность к обобщению. Далее указываем путь к папке, содержащей данные для обучения, задаем размеры изображений для модели, размер батча для итераций обучения и класс данных «categorical». Чтобы избежать переобучения, используем метод обратного вызова EarlyStopping с соответствующими параметрами.

После завершения настройки сети и работы с программой запускается процесс обучения. Обучение построенной модели проводилось с функцией потерь «categorical_crossentropy» и

показателем точности ассигура. Начальная скорость обучения была установлена равной $1e-4$, модель обучалась в течение 32 эпох с параметром batch size = 32. По окончании обучения получается следующий результат (рис. 3).

```
Found 5712 images belonging to 4 classes.
179/179 ————— 6360s 35s/step - accuracy: 0.8324 - loss: 0.4120
WARNING:absl:You are saving your model as an HDF5 file via `model.save()` or `
```

Рис. 3. Результат обучения модели

Fig. 3. Model training result

ТЕСТИРОВАНИЕ ПОЛУЧЕННОЙ МОДЕЛИ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

После завершения обучения модель была протестирована на тренировочных данных. Сравнительные результаты тестирования приведены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты тестирования предобученной модели Xception и ее улучшенной версии

Table 2. Test results of the pre-trained Xception model and its improved version

Модель	Общее количество изображений	Количество обработанных изображений класса	Процент обнаружений класса
<i>Класс «glioma»</i>			
Xception	300	232	77,33%
Улучшенная модель	300	298	99,33%
<i>Класс «meningioma»</i>			
Xception	306	180	58,82%
Улучшенная модель	306	234	76,47%
<i>Класс «pituitary»</i>			
Xception	300	277	92,33%
Улучшенная модель	300	292	97,33%
<i>Класс «notumor»</i>			
Xception	405	389	96,05%
Улучшенная модель	405	405	100%

Из проведенных тестов предобученной модели Xception и ее улучшенной версии следует, что улучшенная модель демонстрирует более высокую точность и устойчивость к различным видам искажений данных, что делает ее более эффективной для задач классификации изображений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках работы были проведены исследование и анализ моделей распознавания и классификации изображений в области медицины. После сравнения наиболее актуальных и доступных моделей на основе сверточных нейронных сетей была выбрана модель Xception, показавшая наилучшие результаты. Эта модель была улучшена с использованием методов переноса обучения и аугментации данных для повышения точности диагностики опухолей головного мозга человека. Из проведенных тестов следует, что улучшенная модель демонстрирует более высокую точность и устойчивость к различным видам искажений данных, что делает ее более эффективной для задач распознавания и классификации изображений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Bishop C.M. Pattern recognition and machine learning (Information Science and Statistics). Springer. New York. 2007. ISBN: 0-387-31073-8
2. Li Z. et al. A survey of convolutional neural networks: analysis, applications, and prospects. *IEEE transactions on neural networks and learning systems*. 2021. Vol. 33. No. 12. Pp. 6999–7019. DOI: 10.1109/TNNLS.2021.3084827
3. Byra M. et al. Breast mass classification in sonography with transfer learning using a deep convolutional neural network and color conversion. *Medical physics*. 2019. Vol. 46. No. 2. Pp. 746–755. DOI: 10.1002/mp.13361
4. Horiuchi Y. et al. Convolutional neural network for differentiating gastric cancer from gastritis using magnified endoscopy with narrow band imaging. *Digestive diseases and sciences*. 2020. Vol. 65. Pp. 1355–1363. DOI: 10.1007/s10620-019-05862-6
5. Wang J. et al. Integral real-time locomotion mode recognition based on GA-CNN for lower limb exoskeleton. *Journal of Bionic Engineering*. 2022. Vol. 19. No. 5. Pp. 1359–1373. DOI: 10.1007/s42235-022-00230-z
6. Bhandari D., Paul S., Narayan A. Deep neural networks for multimodal data fusion and affect recognition. *International Journal of Artificial Intelligence and Soft Computing*. 2020. Vol. 7. No. 2. Pp. 130–145. DOI: 10.1504/IJAISC.2020.113475
7. Srivastava A., Singh A., Tiwari A. K. An efficient hybrid approach for the prediction of epilepsy using CNN with LSTM. *International Journal of Artificial Intelligence and Soft Computing*. 2022. Vol. 7. No. 3. Pp. 179–193. DOI: 10.1504/IJAISC.2022.126336
8. Khan H.A. et al. Brain tumor classification in MRI image using convolutional neural network. *Mathematical Biosciences and Engineering*. 2021. Vol. 17. No. 5. Pp. 6203–6216. DOI: 10.3934/mbe.2020328
9. Houssein E.H. et al. Hybrid quantum-classical convolutional neural network model for COVID-19 prediction using chest X-ray images. *Journal of Computational Design and Engineering*. 2022. Vol. 9. No. 2. Pp. 343–363. DOI: 10.1093/jcde/qwac003
10. Раскопина А. С., Боженко В. В., Татарникова Т. М. Использование глубокого обучения при диагностировании пневмонии по рентгеновским снимкам. *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2024. Т. 67. № 4. С. 315–320. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-4-315-320
- Raskopina A.S., Bozhenko V.V., Tatarnikova T.M. Using deep learning in diagnosing pneumonia from X-ray images. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroyeniye* [News of higher educational institutions. Instrument engineering]. 2024. Vol. 67. No. 4. Pp. 315–320. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-4-315-320. (In Russian)
11. Wan C. et al. Research on classification algorithm of cerebral small vessel disease based on convolutional neural network. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*. 2023. Vol. 44. No. 2. Pp. 3107–3114.
12. Ashtari-Majlan M., Seifi A., Dehshibi M.M. A multi-stream convolutional neural network for classification of progressive MCI in Alzheimer's disease using structural MRI images. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*. 2022. Vol. 26. No. 8. Pp. 3918–3926. DOI: 10.1109/JBHI.2022.3155705
13. Ekong F. et al. Bayesian depth-wise convolutional neural network design for brain tumor MRI classification. *Diagnostics*. 2022. Vol. 12. No. 7. P. 1657. DOI: 10.3390/diagnostics12071657
14. Apostolopoulos I.D., Aznaouridis S., Tzani M. An attention-based deep convolutional neural network for brain tumor and disorder classification and grading in magnetic resonance imaging. *Information*. 2023. Vol. 14. No. 3. P. 174. DOI: 10.3390/info14030174

15. Shi Y. et al. Residual convolutional neural network-based stroke classification with electrical impedance tomography. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2022. Vol. 71. Pp. 1–11. DOI: 10.1109/TIM.2022.3165786

16. Щетинин Е. Ю., Севастьянов Л. А. О методах переноса глубокого обучения в задачах классификации биомедицинских изображений // Информатика и ее применения. 2021. Т. 15. № 4. С. 59–64. DOI: 10.14357/19922264210408. EDN: YQXVAA

Shchetinin E.Yu., Sevastyanov L.A. On deep learning transfer methods in biomedical image classification problems. *Informatika i yeyo primeneniya* [Computer Science and Its Applications]. 2021. Vol. 15. No. 4. Pp. 59–64. DOI: 10.14357/19922264210408. EDN: YQXVAA (In Russian)

17. Щукина Н. А. Нейросетевые модели в задаче классификации медицинских изображений // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2021. Т. 9. № 4(35). DOI: 10.26102/2310-6018/2021.35.4.022. EDN: MXPABV

Shchukina N.A. Neural network models in the problem of classification of medical images. *Modelirovaniye, optimizatsiya i informatsionnyye tekhnologii* [Modeling, Optimization and Information Technology]. 2021. Vol. 9. No. 4(35). DOI: 10.26102/2310-6018/2021.35.4.022. EDN: MXPABV. (In Russian)

18. Simonyan K., Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. 2014. DOI: 10.48550/arXiv.1409.1556

19. Khan A. et al. A survey of the recent architectures of deep convolutional neural networks. *Artificial intelligence review*. 2020. Vol. 53. Pp. 5455–5516.

20. Набор данных МРТ опухоли головного мозга [Электронный ресурс]. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/masoudnickparvar/brain-tumor-mri-dataset>

Nabor dannykh MRT opukholi golovnogo mozga [Brain tumor MRI dataset]. [Electronic resource]. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/masoudnickparvar/brain-tumor-mri-dataset>. (accessed 10.03.2025)

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Информация об авторах

Пшенокова Инна Ауесовна, канд. физ.-мат. наук, зав. лаб. «Интеллектуальные среды обитания», Институт информатики и проблем регионального управления – филиал Кабардино-Балкарского научного центра РАН;

360000, Россия, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а;

доцент кафедры «Компьютерные технологии и информационная безопасность», Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х. М. Бербекова;

360004, Россия, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173;

pschenokova_inna@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3394-7682>, SPIN-код: 3535-2963

Киясов Мурат Русланович, студент 4-го курса направления «Информатика и вычислительная техника», Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х. М. Бербекова;

360004, Россия, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173;

myrat7450@mail.ru

Information about the authors

Inna A. Pshenokova, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Laboratory of Intelligent Living Environments, Institute of Computer Science and Problems of Regional Management – branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

360000, Russia, Nalchik, 37-a I. Armand street;

Associate Professor of the Department of Computer Technology and Information Security, Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov;

360004, Russia, Nalchik, 173 Chernyshevsky street;

pshenokova_inna@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3394-7682>, SPIN-code: 3535-2963

Murat R. Kiyasov, 4th year Student in the Field of Informatics and Computer Science; Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov;

360004, Russia, Nalchik, 173 Chernyshevsky street;

myrat7450@mail.ru

УДК 634.737:631.534(470.64)

DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-2-113-121

EDN: ROUFHN

Научная статья

Влияние различных приемов воздействия на побеги голубики высокорослой при размножении отводками

Е. М. Егорова^{✉1}, Ф. Д. Таумурзаева²

¹Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова
360030, Россия, г. Нальчик, пр-т Ленина, 1в

²Северо-Кавказский научно-исследовательский институт горного и предгорного садоводства
360004, Россия, г. Нальчик, ул. Шарданова, 23

Аннотация. В статье приведены результаты исследований по укоренению отводков голубики высокорослой, проведенных в 2022–2024 годах в предгорной зоне КБР (ООО «Юг Агро»). Отводки при их контакте с влажным торфяным субстратом непосредственно в полевых условиях способны к укоренению. Преимуществами данного способа размножения являются его простота, не требующая использования дорогостоящих технологических элементов, высокий процент укоренения, а также отсутствие необходимости доращивания для посадки на постоянное место. **Цель исследования** – оптимизация способа размножения голубики высокорослой отводками в условиях предгорной зоны Кабардино-Балкарии. **Методы исследований.** Бороздование коры заглубляемой в грунт части побега проводилось ножом с зубчиками. В вариантах со стимуляцией корнеобразования препаратом «Фитактив экстра плюс» гель наносился на заглубляемую часть побега после бороздования (или без него) кистью. Каждый опытный вариант закладывался и учитывался в трех повторностях по 100 учетных отводков в каждой повторности. **Результаты исследований.** Установлено, что проведение бороздования коры и последующая обработка этой зоны гелем «Фитактив экстра плюс» перед заглублением побегов в грунт обеспечивает укоренение 81% отводков. При этом корни прочные, белые, хорошо разветвленные, проникают в почву в среднем на 16 см. Таким образом обеспечивается получение посадочного материала, пригодного для посадки на постоянное место без дополнительного доращивания за один вегетационный период.

Ключевые слова: голубика, укоренение, корневая система, торф, отводки, бороздование коры, Фитактив гель

Поступила 07.02.2025, одобрена после рецензирования 28.02.2025, принята к публикации 07.03.2025

Для цитирования. Егорова Е. М., Таумурзаева Ф. Д. Влияние различных приемов воздействия на побеги голубики высокорослой при размножении отводками // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2025. Т. 27. № 2. С. 113–121. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-2-113-121

Original article

Propagation of tall blueberries by rooting layers in the conditions of the foothill zone of the KBR

E.M. Egorova^{✉1}, F.D. Taumurzayeva²

¹Kabardino-Balkarian State Agricultural University named after V.M. Kokov
360030, Russia, Nalchik, 1v Lenin avenue

²North Caucasus Research Institute of Mountain and Foothill Horticulture
360004, Russia, Nalchik, 23 Shardanova street

Abstract. The article presents the results of studies on the rooting of tall blueberry cuttings conducted in 2022–2024 in the foothill zone of the KBR (LLC "Yug Agro"). Layering, when in contact with a wet peat substrate, is capable of rooting directly in the field. The advantage of this method of reproduction is its simplicity, which does not require the use of expensive technological elements, a high percentage of rooting, as well as the absence of the need for additional cultivation for planting in a permanent place. **The purpose of the study** – is to optimize the method of propagation of tall blueberries by layering in the conditions of the foothill zone of Kabardino-Balkaria. **Research methods.** The furrowing of the bark of the part of the shoot buried in the ground was carried out with a knife with teeth. In variants with stimulation of root formation with Phytactive Extra Plus, the gel was applied to the buried part of the shoot after furrowing (or without it) with a brush. Each experimental version was laid and accounted for in three repetitions of 100 accounting layers in each repetition. **Research results.** It was found that furrowing the bark and subsequent treatment of this area with Phytactive Extra Plus gel before the shoots are sunk into the ground ensures the rooting of 81% of the layers. At the same time, the roots are strong, white, well-branched, and penetrate into the soil by an average of 16 cm. This ensures that the planting material is suitable for planting in a permanent place without additional regrowth during one growing season.

Key words: blueberry, rooting, root system, peat, layering, furrowing, Phytactive gel

Submitted 07.02.2025,

approved after reviewing 28.02.2025,

accepted for publication 07.03.2025

For citation. Egorova E.M., Taumurzayeva F.D. Propagation of tall blueberries by rooting layers in the conditions of the foothill zone of the KBR. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2025. Vol. 27. No. 2. Pp. 113–121. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-2-113-121

ВВЕДЕНИЕ

Культивировать высокорослую голубику начали в прошлом столетии в Северной Америке [1]. Ягоды нормализуют кровяное давление у гипертоников, положительно влияют на работу кровеносной системы, являются источником железа и повышают уровень гемоглобина. Кроме того, употребление голубики, а также отваров из листьев способствует снижению уровня глюкозы в крови [2]. Ягоды голубики благодаря своим целебным свойствам и приятному вкусу стали причиной расширения сельскохозяйственных угодий, предназначенных для ее выращивания [3–5].

Однако возникают сложности в процессе адаптации растений голубики высокорослой к почвенно-климатическим условиям Кабардино-Балкарии, что становится серьезной проблемой для ее масштабирования в сельскохозяйственной отрасли. Голубика высокорослая является растением-ацедофиллом. Для хорошего развития и получения высокого урожая ей необходима водо- и воздухопроницаемая почва с кислой реакцией среды. Это и является основным лимитирующим фактором при ее возделывании [6].

Хозяйство ООО «Юг-Агро» с 2022 года выращивает голубику сорта Дюк [7]. В связи с тем, что почвы хозяйства не соответствуют требованиям данной культуры, пришлось провести подготовительные мероприятия: внести в почву серу молотую после уборки предшествующей культуры; использовать кислый торф при формировании гряд, а также в течение вегетационного периода подкислять питательный раствор путем добавления в него азотной или серной кислоты [8–10].

К концу первого вегетационного сезона появились выпады, которые необходимо было восполнять. В последние годы, когда санкционные меры ограничивают импорт саженцев из-за границы, создались предпосылки для самостоятельного производства посадочного материала на территории хозяйства для проведения ремонта насаждений.

В данном хозяйстве нами проведены исследования по укоренению одревесневших черенков на различных субстратах с применением корнеобразователей без туманообразующей

установки. Опыт показал хозяйственно-приемлемую укореняемость на торфо-перлитном субстрате (3:1) с обработкой черенков гелем «Фитактив Экстра плюс» (до 58 % укоренения при хорошем качестве корней) [11].

Однако укоренение черенков является трудоемким процессом, который включает в себя сбор побегов после обрезки, перенос этих побегов в помещение, нарезку черенков, их подготовку, а также создание и поддержание оптимальных микроклиматических условий [12]. Черенкование в наших исследованиях дало хорошие результаты, но в силу отсутствия туманообразующей установки приходилось сталкиваться со сложностями для поддержания влажности субстрата и воздуха. Кроме того, даже хорошо укоренившиеся черенки не пригодны сразу для посадки на постоянное место. Они требуют дополнительного доращивания, что удлиняет период производства посадочного материала.

Поэтому встал вопрос о разработке и внедрении другого способа размножения голубики с меньшими трудозатратами.

Из опыта Н. Б. Павловского известно, что отводки при их контакте с влажным торфяным субстратом непосредственно в полевых условиях также способны к укоренению. Размножение отводками основано на образовании корней на побеге до того, как он будет отделен от материнского растения. Побег пригибают к земле, неглубоко прикапывают или прижимают, над поверхностью почвы оставляют верхушку побега. После образования корней и побегов из боковых почек, отводок отделяют от материнского растения и пересаживают на новое место. Преимуществами данного способа размножения растений являются его простота, не требующая использования дорогостоящих технологических элементов, а также высокий процент укоренения [13].

Так как во время укоренения одревесневших черенков хорошо зарекомендовал себя Фитактив гель в качестве препарата, стимулирующего корнеобразование, было принято решение о его использовании при размножении голубики отводками.

Цель исследований – оптимизация способа размножения голубики укорененными отводками в условиях предгорной зоны КБР.

Задачи исследований – оценка влияния приема бороздования коры побега голубики высокорослой на его укоренение; определение корнеобразующего действия геля «Фитактив Экстра плюс» при укоренении отводков голубики.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проводились в 2022–2024 гг. в предгорной зоне Кабардино-Балкарской Республики (ООО «Юг Агро», г. Нальчик).

Закладка опытов, наблюдения и учеты выполнялись по методикам Б. А. Доспехова и Е. Я. Лебедево [14, 15].

Опыты по укоренению отводков голубики высокорослой проводились по следующей схеме:

1. Контроль (заглубление побегов без бороздования коры и обработки корнеобразователем).
2. Бороздование коры с последующей обработкой гелем «Фитактив Экстра плюс».
3. Обработка гелем «Фитактив Экстра плюс» без предварительного бороздования коры.
4. Бороздование коры без обработки гелем «Фитактив Экстра плюс».

Бороздование заглубляемой в грунт части побега проводилось ножом с зубчиками. В вариантах со стимуляцией корнеобразования препаратом «Фитактив гель» он наносился на заглубляемую часть побега после бороздования (или без него) кистью.

Состав корнестимулирующего геля «Фитактив Экстра плюс» включает ауксин-фуллереновый комплекс на основе индолилмасляной кислоты (5 г/л), витамины B1,

В6, РР (в суммарном количестве 0,3 г/л), аминокислотную кислоту (0,2 г/л). В состав препарата входит также биоцид, обеспечивающий фунгицидное действие¹.

Каждый опытный вариант закладывался и учитывался в трех повторностях по 100 учетных отводков в каждой повторности.

Пригибание и закрепление в грунте отводков по вариантам опыта проводилось весной, в начале периода сокодвижения.

В конце вегетационного периода проводился учет развития корневой системы отводками голубики. Оценивались:

- укореняемость отводков, в %;
- глубина проникновения корней в грунт, см;
- состояние развития корней, в баллах.

Качественные характеристики корневых систем, такие как дружность прорастания корешков, их толщину, цвет, степень обрастания тонкими всасывающими корешками оценивали визуально по 4-балльной системе:

1 балл – основные корни очень тонкие, без визуально различимых дополнительных всасывающих корней, коричневатые, рано отмирающие;

2 балла – корни тонкие, но жизнеспособные, без (или с редкими) визуально различимых дополнительных всасывающих корней, желтоватые;

3 балла – корни более прочные, в средней степени с визуально-различимыми дополнительными всасывающими корнями, белые или немного желтоватые, кончики корней рано прекращают рост и могут темнеть;

4 балла – корни прочные, белые, с многочисленными белыми дополнительными тонкими всасывающими корнями.

На рисунках 1, 2 наглядно продемонстрировано закрепление в грунте отводков голубики высокорослой. Для этой процедуры заранее были подготовлены «шпильки» из нержавеющей стали.



Рис. 1, 2. Процесс пригибания отводков

Fig. 1, 2. The process of bending the layers

¹<https://fitaktivagro.ru/extraplus?Ysclid=m5oz3v5yg3278628977>

В насаждении голубики высокорослой 2022 года посадки мы проводили бороздование и нанесение геля Фитактив (в соответствии с вариантами опыта) на молодые, гибкие побеги в нижней части куста, после чего пригнули и зафиксировали их в грунте «шпилькой».

Полученные данные обрабатывались методом математического анализа по Б. А. Доспехову с применением ПК. В частности, вычислялась НСР₀₅ – наименьшая существенная разница на 95-процентном уровне вероятности [14].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты проведенных исследований приведены в таблице.

Таблица. Укореняемость отводков голубики высокорослой и степень развития корней в зависимости от способов воздействия на укореняемые побеги

Table. The rootability of the layers of tall blueberries and the degree of root development, depending on the methods of exposure to rooted shoots

Варианты опыта	Укореняемость, %	Степень развития корней, балл	Глубина проникновения корней в грунт, см
Контроль	40	3	10
Бороздование +Фитактив	81	4	16
Фитактив без бороздования	69	4	12
Бороздование без Фитактива	47	3	11
Укоренение одревесневших черенков (субстрат торф + перлит (3:1); обработка гелем Фитактив)	58	4	5
НСР ₀₅	10,2		2,8

Полученные данные свидетельствуют о существенном влиянии изучаемых методов обработки побегов (отводков) перед их заглублением в грунт на их укоренение.

Так, в контроле (без бороздования и стимуляторов корнеобразования) отмечен худший результат укоренения – всего 40 % отводков.

Применение перед заглублением в грунт отводков только бороздования существенного влияния ни на количество укоренившихся отводков (на 7% больше контроля), ни на качество образовавшихся корней не оказало.

Предварительная обработка заглубляемой части побега гелем Фитактив, даже без бороздования, оказала существенное стимулирующее действие: количество укоренившихся отводков (69 %) оказалось в 1,7 раза больше, чем в контроле. Качество образовавшихся корней также лучше контрольных. Степень их развития оценивается в 4 балла на фоне 3 баллов в контроле.

Подготовка отводков путем предварительного бороздования и обработки Фитактивом улучшила результат укоренения вдвое по сравнению с контролем, почти в 1,2 раза по сравнению с обработкой Фитактивом (без бороздования) и более чем в 1,7 раза по сравнению с бороздованием без стимуляции Фитактивом. То есть подготовка отводков к укоренению путем последовательного бороздования и нанесения геля Фитактив достоверно увеличивает количество укоренившихся отводков.

Состояние корневой системы при использовании геля Фитактив в разных вариантах опыта оценивалось на 4 балла (корни хорошо развиты, белые, с многочисленными белыми дополнительными тонкими всасывающими корнями). Корневая система в контроле и в варианте опыта без стимулятора была оценена на 3 балла (корни прочные, в средней степени с визуально различимыми дополнительными всасывающими корнями, белые или немного желтоватые, кончики корней рано прекращают рост и могут темнеть).

Оценка глубины проникновения корней в почву показала достоверно лучший результат в варианте бороздования коры и последующей обработки заглубляемой части побега гелем «Фитактив Экстра плюс» – 16 см, что на 6 см больше, чем в контрольном варианте (10 см) (рис. 3).

Остальные варианты (бороздование без обработки Фитактивом и обработка Фитактивом без предварительного бороздования коры) отличаются от контроля несущественно (на 1 и 2 см соответственно при $НСР_{05} = 2,8$ см). Таким образом, использование стимулятора «Фитактив Экстра плюс» с предварительным бороздованием коры достоверно дает положительные результаты по укоренению отводков.



Рис. 3. Корневая система, образовавшаяся на отводках в контроле (слева) и в варианте подготовки отводков путем бороздования коры и последующей обработки гелем Фитактив (справа)

Fig. 3. The root system formed on the layers in the control (left) and in the variant of layer preparation by furrowing the bark and subsequent treatment with Phytactive gel (right)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При производстве посадочного материала голубики высокорослой укоренением отводков эффективно подвергать заглубляемую часть побега бороздованию коры и обрабатывать стимулятором «Фитактив Экстра плюс». При этом укореняемость отводков составляет 81 %, что позволяет в производственных условиях получать саженцы для ремонта имеющихся насаждений данной культуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ретамалес Дж. Б., Хэнкок Дж. Ф. Черника. Cabi, 2018. Т. 27. 352 с.
2. Пинчукова Ю. М., Масанский С. Л. Пищевая ценность плодов голубики // Голубиководство в Беларуси: итоги и перспективы. 2012. С. 45–48. EDN: YOZCNA
3. Акимова С. В., Мацкевич М. П. Изучение особенностей выращивания голубики высокорослой в условиях Нечерноземной зоны // Плодоводство и ягодоводство России. 2017. Т. 50. С. 29–32.
4. Мищенко А. Р., Бражная И. Э. Исследование химического состава ягод голубики и перспективы использования в питании // Студенческая наука: актуальные вопросы, достижения и инновации. 2021. С. 50–53. EDN: VMARED
5. Даньков В. В., Скрипниченко М. М., Логинова С. Ф. и др. Ягодные культуры. СПб.: Лань, 2015. С. 19–24.
6. Януков В. В., Мушкат Л. П., Шашута Н. Ф. Выращивание голубики высокорослой в северном регионе Беларуси // Химия и жизнь. 2022. С. 608–615. EDN: LQSEdV
7. Егорова Е. М., Таумурзаева Ф. Д., Абрегов А. А. Влияние карбонатов почвы на состояние растений голубики высокорослой в условиях КБР // Новые технологии. 2024. Т. 20. № 1. С. 136–145. DOI: 10.47370/2072-0920-2024-20-1-136-145. EDN: DDYONM
8. Jiang Y. et al. The effect of soil pH on plant growth, leaf chlorophyll fluorescence and mineral element content of two blueberries // XI International Vaccinium Symposium 1180. 2016. Pp. 269–276. DOI:10.17660/ActaHortic.2017.1180.36
9. Yang Z. et al. Effect of repeated applications of elemental sulfur on microbial population, sulfate concentration, and pH in soils // Communications in soil science and plant analysis. 2007. Vol. 39. No. 1–2. Pp. 124–140. DOI:10.1080/00103620701759079
10. Ochmian I. et al. Chemical and enzymatic changes of different soils during their acidification to adapt them to the cultivation of highbush blueberry. Agronomy. 2020. Vol. 11. No. 1. P. 44. DOI:10.3390/agronomy11010044
11. Егорова Е. М., Таумурзаева Ф. Д. Укоренение одревесневших черенков голубики высокорослой без применения туманообразующей системы // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2025. Т. 27. № 1. С. 11–19. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-1-11-19
12. Голяева О. и др. Производство оздоровленного посадочного материала ягодных и малораспространенных культур. Litres, 2023. 240 с.
13. Павловский Н. Б. Методы вегетативного размножения голубики высокой (*Vaccinium corymbosum* L.) // Плодоводство. 2010. Т. 22. № 1. С. 332–344.
14. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Книга по требованию, 2012. 352 с.
15. Лебедько Е. Я. Биометрия в msexel: учебное пособие. М.: Изд-во Лань, 2018. 593 с.

REFERENCES

1. Retamales J.B., Hancock J.F. *Blueberries*. Cabi, 2018. Vol. 27. 352 p.
2. Pinchukova Yu.M., Masansky S.L. Nutritional value of blueberry fruits. *Golubikovodstvo v Belarusi: itogi i perspektivy* [Blueberry farming in Belarus: results and prospects]. 2012. Pp. 45–48. EDN: YOZCNA. (In Russian)
3. Akimova S.V., Matskevich M.P. Studying the peculiarities of growing tall blueberries in the non-Chernozem zone. *Plodovodstvo i yagodovodstvo Rossii* [Fruit and berry growing in Russia]. 2017. Vol. 50. Pp. 29–32. (In Russian)

4. Mishchenkova A.R., Brazhnaya I.E. Study of the chemical composition of blueberry berries and prospects for use in nutrition. *Studencheskaya nauka: aktual'nyye voprosy, dostizheniya i innovatsii* [Student science: Current issues, achievements and innovations]. 2021. Pp. 50–53. EDN: VMARED. (In Russian)
5. Dankov V.V., Skripnichenko M.M., Loginova S.F. et al. *Yagodnyye kul'tury* [Berry crops]. St. Petersburg: Lan, 2015. Pp. 19–24. (In Russian)
6. Yanukov V.V., Mushkat L.P., Shashuta N.F. Growing tall blueberries in the northern region of Belarus. *Khimiya i zhizn'* [Chemistry and Life]. 2022. Pp. 608–615. EDN: LQSEDV. (In Russian)
7. Egorova E.M., Taumurzaeva F.D., Abregov A.A. Influence of soil carbonates on the condition of tall blueberry plants in the CBD. *Novyye tekhnologii* [New technologies]. 2024. Vol. 20. No. 1. Pp. 136–145. DOI: 10.47370/2072-0920-2024-20-1-136-145. EDN: DDYONM. (In Russian)
8. Jiang Y. et al. The effect of soil pH on plant growth, leaf chlorophyll fluorescence and mineral element content of two blueberries. *XI International Vaccinium Symposium 1180*. 2016. Pp. 269–276. DOI:10.17660/ActaHortic.2017.1180.36
9. Yang Z. et al. Effect of repeated applications of elemental sulfur on microbial population, sulfate concentration, and pH in soils. *Communications in soil science and plant analysis*. 2007. Vol. 39. No. 1–2. Pp. 124–140. DOI:10.1080/00103620701759079
10. Ochmian I. et al. Chemical and enzymatic changes of different soils during their acidification to adapt them to the cultivation of highbush blueberry. *Agronomy*. 2020. Vol. 11. No. 1. P. 44. DOI:10.3390/agronomy11010044
11. Egorova E.M., Taumurzayeva F.D. Rooting of woody cuttings of tall blueberries without the use of a fog-forming system. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2025. Vol. 27. No. 1. Pp. 11–19. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-1-11-17 (In Russian)
12. Golyaeva O. et al. *Proizvodstvo ozdorovlennogo posadochnogo materiala yagodnykh i malorasprostranennykh kul'tur* [Production of healthy planting material for berry and sparsely distributed crops]. Liters, 2023. 240 p. (In Russian)
13. Pavlovsky N.B. Methods of vegetative propagation of high blueberries (*Vaccinium corymbosum* L.). *Plodovodstvo* [Fruit growing]. 2010. Vol. 22. No. 1. Pp. 332–344. (In Russian)
14. Dospekhov B.A. *Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoy obrabotki rezul'tatov issledovaniy)* [Methodology of field experience (with the basics of statistical processing of research results)]. Moscow: Kniga po trebovaniyu, 2012. 352 p. (In Russian)
15. Lebedko E.Ya. *Biometriya v msexel* [Biometrics in msexel]: textbook. Moscow: Izdatel'stvo «Lan'», 2018. 593 p. (In Russian)

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Вклад авторов:

Е. М. Егорова – концептуализация и проектирование исследований, участие в проведении опытов, анализ данных и их интерпретация, критический анализ текста рукописи, финальная доработка текста статьи;

Ф. Д. Таумурзаева – закладка и выполнение полевых опытов, сбор данных, подготовка рукописи.

Contribution of the authors:

E.M. Egorova – conceptualization and design of research, participation in experiments, data analysis and interpretation, critical analysis of the manuscript text, final revision of the article text;

F.D. Taumurzaeva – laying out and performing field experiments, data collection, manuscript preparation.

Информация об авторах

Егорова Елена Михайловна, канд. с.-х. наук, доцент кафедры агрономии, Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова;

360030, Россия, г. Нальчик, пр-т Ленина, 1в;

conf200606@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9559-4608>, SPIN-код: 1914-0691

Таумурзаева Фарида Даутовна, мл. науч. сотр., Северо-Кавказский научно-исследовательский институт горного и предгорного садоводства;

360004, Россия, г. Нальчик, ул. Шарданова, 23

Information about the authors

Elena M. Egorova, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Agronomy, Kabardino-Balkarian State Agricultural University named after V.M. Kokov;

360030, Russia, Nalchik, 1v Lenin avenue;

conf200606@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9559-4608>, SPIN-code: 1914-0691

Farida D. Taumurzayeva, Junior Researcher, North Caucasian Research Institute of Mountain and Foothill Horticulture;

360004, Russia, Nalchik, 23 Shardanova street

УДК 633.282:631.524.84

DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-2-122-129

EDN: RRBPMC

Научная статья

Продуктивность сортов суданской травы на фоне применения регуляторов роста

О. Д. Качаров✉, М. Р. Мусаев

Дагестанский государственный аграрный университет имени М. М. Джамбулатова
367032, Россия, г. Махачкала, ул. Магомета Гаджиева, 180

Аннотация. Согласно данным многих ученых, эффективность АПК в значительной степени определяется использованием достижений научно-технического прогресса и получением стабильно высоких урожаев сельскохозяйственных культур. В этой связи, по их мнению, необходимо обратить внимание на внедрение современных технологий возделывания высокопродуктивных растений, среди которых важное место занимает суданская трава. Одним из инновационных достижений в сельском хозяйстве является применение регуляторов роста. С учетом вышеизложенного, с целью изучения продуктивности сортов суданской травы в условиях Моздокского района РСО – Алания в 2022–2023 гг. были проведены полевые исследования. В результате установлено, что сорта суданской травы максимальную площадь листовой поверхности сформировали на фоне регулятора роста Мегамикс. Превышения с контролем, а также с вариантами с Альбитом и Мивал-агро составили 10,7; 7,7 и 3,9 %. Наибольшую площадь листьев сформировал сорт Грация – 51,9 тыс. м²/га, а минимальные площади наблюдались у сортов Александрина и Анастасия. Наибольшая урожайность зафиксирована на варианте с регулятором Мегамикс и на посевах сорта Грация.

Ключевые слова: Моздокский район, РСО – Алания, суданская трава, сорта, регуляторы роста, фотосинтетическая деятельность, урожайность

Поступила 11.02.2025, одобрена после рецензирования 24.02.2025, принята к публикации 11.03.2025

Для цитирования. Качаров О. Д., Мусаев М. Р. Продуктивность сортов суданской травы на фоне применения регуляторов роста // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2025. Т. 27. № 2. С. 122–129. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-2-122-129

Original article

Productivity of varieties of Sudanese grass against the background of the use of growth regulators

O.D. Kacharov✉, M.R. Musaev

Dagestan State Agrarian University named after M.M. Dzhambulatov
367032, Russia, Makhachkala, 180 Magomet Gadzhiev street

Abstract. According to many scientists the effectiveness of agriculture is largely determined by the use of scientific and technological progress and consistently high yields of agricultural crops. In this regard, according to their data, it is necessary to pay attention to the introduction of modern technologies for the cultivation of highly productive plants, among which Sudanese grass takes an important place. One of the innovative achievements in agriculture is the use of growth regulators. Taking into account the above, field studies were conducted in 2022–2023 in order to study the productivity of varieties of Sudanese grass in

the Mozdoksky district of North Ossetia-Alania. As a result, it was found that the varieties of Sudanese grass formed the maximum leaf surface area against the background of the Megamix growth regulator. The excess with the control, as well as with the variants with Albit and Mival-agro, amounted to 10.7, 7.7 and 3.9%. Among the varieties, the Grazia variety formed the largest leaf area – 51.9 thousand m²/ha, while the minimum was observed in the Alexandrina and Anastasia varieties. The highest yields were recorded on the variant with the Megamix regulator and on crops of the Grazia variety.

Keywords: Mozdok district, North Ossetia-Alania, Sudanese grass, varieties, growth regulators, photosynthetic activity, yield

Submitted 11.02.2025,

approved after reviewing 24.02.2025,

accepted for publication 11.03.2025

For citation. Kacharov O.D., Musaev M.R. Productivity of varieties of Sudanese grass against the background of the use of growth regulators. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2025. Vol. 27. No. 2. Pp. 122–129. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-2-122-129

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. В последние годы важной задачей сельхозпроизводителей является обеспечение продовольственной безопасности страны. Значительная роль в решении данной проблемы отводится отрасли животноводства. В связи с резким изменением климата продуктивность основных кормовых культур значительно снизилась, поэтому необходимо уделять внимание выращиванию засухоустойчивых культур, к которым, по данным многих исследователей, относится суданская трава [1–4].

В крайне засушливых условиях Ростовской области в полевых исследованиях Н. А. Ковтуновой, В. В. Ковтунова и Е. А. Шишовой сорта суданской травы обеспечили достаточно высокую урожайность в сумме за 2 укоса: скороспелые формы – 21–23 т/га; ранне-спелые – 20–30 т/га; среднераннеспелые – 32–43 т/га, а среднеспелые – 33–43 т/га [5].

В начальный период развития растения суданской травы, как и сорговые культуры, формируют корневую систему, в связи с чем наблюдается слабое развитие надземной массы. Как отмечают некоторые исследователи, в целях повышения продуктивности суданской травы целесообразным является применение ростовых веществ для обработки семян, которые повышают посевные качества семян, улучшают сохранность растений к периоду уборки и увеличивают урожайность зеленой массы и семенного зерна [6–12].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Проведение исследований осуществлялось в 2022–2024 гг. в условиях КФХ «Кулаев Юрий Заурбекович» Моздокского района РСО – Алания. В ходе проведения исследований для повышения эффективности технологии выращивания сортов суданской травы, по сравнению с контролем (водой без стимуляторов роста), была проведена оценка эффективности существующих на рынке регуляторов роста Альбит, Мивал-агро и стимулятора роста Мегамикс.

В качестве объекта полевого эксперимента были выбраны сорта суданской травы Землячка, Александрина, Алиса, Анастасия, Грация, Спутница. Оригинаторами сортов Землячка и Спутница являются ученые Северо-Кавказского научного аграрного центра, а сортов Александрина, Алиса, Анастасия, Грация – ученые аграрного научного центра «Донской».

Семена суданской травы перед посевом обрабатывали вручную регуляторами роста в следующих дозах: Альбит – 60 мл/т; Мивал-агро – 15 г/т; Мегамикс – 2 л/т.

Норма посева составила 25–30 кг/га. По условиям увлажнения годы проведения исследований характеризовались следующим образом: период вегетации 2022 года как сухой

(ГТК = 0,4), 2023 года – как слабозасушливый (ГТК = 0,9), а период 2024 года – как очень засушливый (ГТК = 0,6).

Полевые опыты закладывались в четырехкратной повторности. Площадь опытных делянок – 100 м², учетных – 25 м², размещение вариантов рендомизированное. Агротехника возделывания суданской травы обычная для зоны. Полевые опыты заложены по методическим указаниям Б. А. Доспехова (1985). Наблюдения за ростом и развитием трав вели по методике «Государственные сортоиспытания сельскохозяйственных культур» (1989).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты наших исследований показали, что использование ростовых веществ при предпосевной обработке семян суданской травы оказалось высокоэффективным. Изучаемые нами регуляторы роста оказали положительное влияние на фотосинтетическую деятельность сортов вышеуказанной культуры. Так, если на контрольном варианте в среднем по сортам площадь листовой поверхности составила 45,0 тыс. м²/га, то при обработке ростовым веществом Альбит она возросла на 2,4 % (рис. 1).

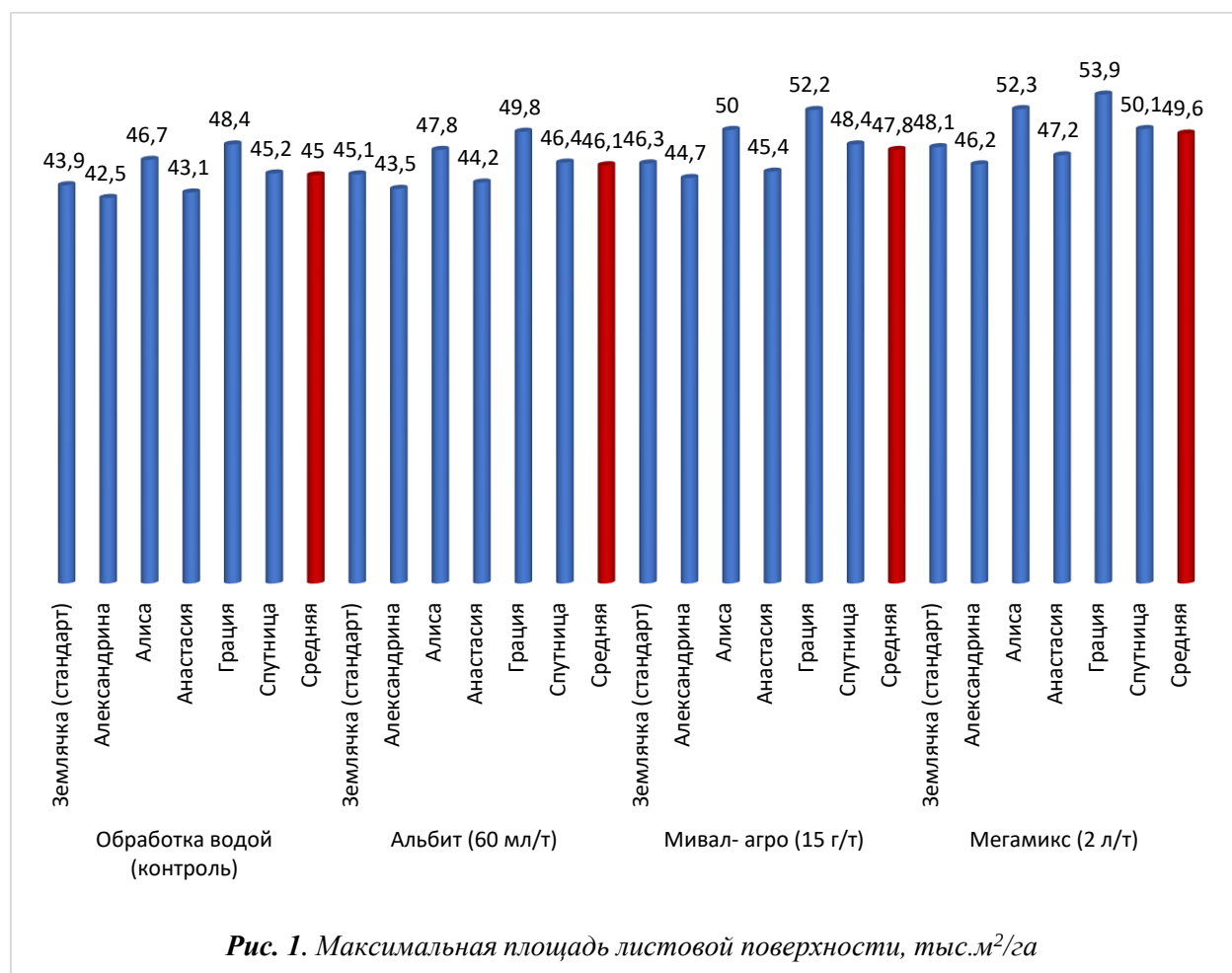


Рис. 1. Максимальная площадь листовой поверхности, тыс.м²/га

Fig. 1. Maximum leaf surface area, thousand m²/ha

На фоне применения ростового вещества Мивал-агро площадь листьев в среднем составила 47,8 тыс. м²/га, превышение по сравнению с первым вариантом (контроль) составило 6,2 %. Максимальную площадь листовой поверхности сорта суданской травы сформировали при применении стимулятора роста Мегамикс – в среднем 50,5 тыс. м²/га. Разница

с данными контроля составила 10,7 %, а с данными регуляторов роста Альбит и Мивал-агро – 7,7 и 3,9 % (рис. 1).

Среди сортов наибольшую листовую поверхность сформировала Грация – в среднем по вариантам опыта 51,9 тыс. м²/га. На посевах сорта Землячка площадь листьев отмечена на уровне 46,6 тыс. м²/га, разница с предыдущим сортом составила 11,4 %.

Площадь листьев сортов Александрина, Алиса, Анастасия и Спутница составила соответственно 45,0; 50,1; 45,7; 48,4 тыс. м²/га, снижение по сравнению с сортом Грация отмечено в пределах 15,3; 3,6; 13,6 и 7,2 %.

Применяемые в опыте регуляторы роста способствовали повышению урожайности сортов суданской травы. Так, если на контрольном варианте (обработка водой) за два укоса она составила 54,0 т/га, то при обработке Альбитом урожайность повысилась до 56,9 т/га, что больше предыдущего варианта на 3,8 % (рис. 2).

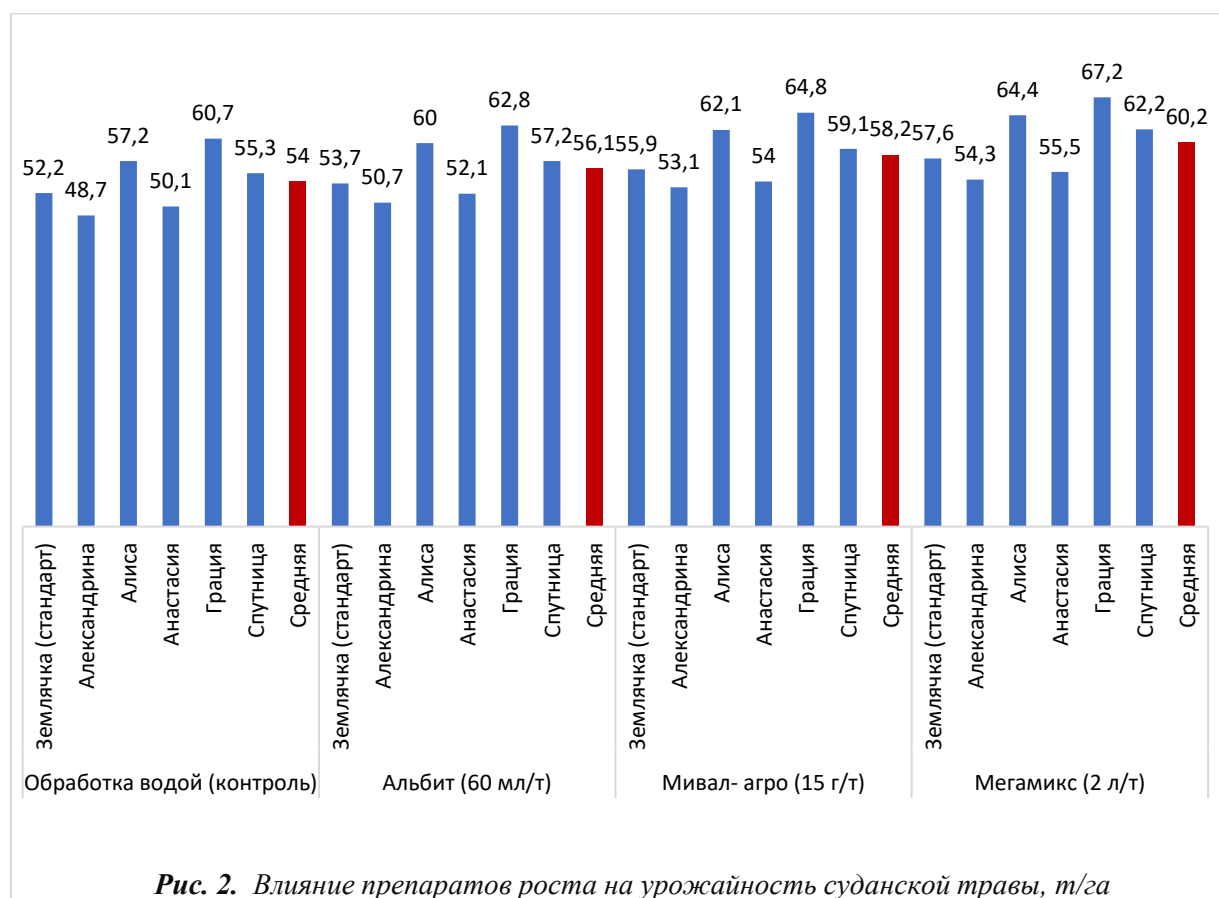


Рис. 2. Влияние препаратов роста на урожайность суданской травы, т/га

Fig. 2. Effect of growth preparations on the yield of Sudanese grass, t/ha

НСР₀₅ : 2022 – 1,3; 2023 – 1,4; 2024 – 1,3.

Проведенные исследования также показали, что значительную продуктивность сорта суданской травы сформировали на фоне применения стимулятора роста Мегамикс – в среднем по сортам 60,2 т/га. В случае возделывания сортов на контрольном варианте отмечено снижение вышеуказанного показателя на 11,5 %, а на вариантах, где применялись Альбит и Мивал-агро, снижение составило 7,3 и 3,4 %. На следующей позиции по урожайности расположились данные регулятора Мивал-агро, где средняя урожайность составила 59,2 т/га.

Среди сортов по урожайности лидирует Грация, где в среднем по вариантам опыта она составила 63,9 т/га. Превышение по сравнению со стандартом составило 16,6 %, с сортом

Александрина – 23,6 %, а с данными сортов Алиса, Анастасия и Спутница – соответственно 4,9; 20,8; 9,4 %. Кроме того, в проведенных исследованиях выявлено, что достаточно высокая урожайность на уровне 62,0 т/га зафиксирована на посевах сорта Алиса.

Согласно нашим расчетам, между урожайностью и площадью листовой поверхности существует прямая коррелятивная связь. Как видно из приведенных ниже уравнений регрессии, на контроле (обработка водой) слабая зависимость отмечена на посевах сорта Землячка – $r = 0,6094$.

Обработка водой (контроль):

Землячка – $y = 0,502x + 29,828$; $r = 0,6094$;

Грация – $y = 0,4063x + 42,556$; $r = 0,7445$.

Данная зависимость была высокой при возделывании сорта Грация – $r = 0,7445$. На вариантах с регуляторами роста указанная зависимость между вышеуказанными параметрами повысилась. Так, на варианте с регулятором Альбит коэффициенты корреляции составили $r = 0,6981$ и $r = 0,7599$, при этом достаточно высокая зависимость наблюдалась у сорта Грация – $r = 0,7599$.

Альбит:

Землячка – $y = 0,908x + 12,915$; $r = 0,6981$;

Грация – $y = 0,449x + 38,65$; $r = 0,7599$.

На варианте с использованием ростового вещества Мивал-агро зафиксированы более высокие взаимосвязи: у сорта Землячка – $r = 0,7334$, а на делянках с сортом Грация – $r = 0,8059$.

Мивал-агро:

Землячка – $y = 0,3702x + 39,263$; $r = 0,7334$;

Грация – $y = 0,3875x + 44,968$; $r = 0,8059$.

Достаточно высокая тесная взаимосвязь обнаружена на варианте с ростовым веществом Мегамикс.

Мегамикс:

Землячка – $y = 0,4162x + 37,224$; $r = 0,7526$;

Грация – $y = 0,1485x + 57,281$; $r = 0,9128$.

Так, при возделывании сорта Землячка она составила $r = 0,7526$, а на посевах сорта Грация – $r = 0,9128$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Следовательно, в условиях Моздокского района РСО – Алания наибольшая эффективность была достигнута при применении регулятора роста Мегамикс дозой 2,0 л/т. Наибольшую продуктивность обеспечил сорт Грация.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации: Указ Президента РФ № 20 от 21.01.2020 г. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/73338425/#review>

2. Васькина Т. И., Дронов А. В., Бельченко С. А. Обоснование применения биорегуляторов роста при возделывании сорго сахарного в агроландшафтных условиях Брянской области // Вестник Брянской ГСХА. 2024. № 1(101). С. 29–33.

3. Васильченко М. Я., Трифонова Е. Н. Состояние и перспективы стратегического развития молочно-продуктивного комплекса в регионах РФ, неблагоприятных для ведения сельского хозяйства // Региональные особенности управления развитием агропродовольственного комплекса. 2020. № 2. С. 70–85. EDN: LMDBBN

4. Кишикаткина А. Н., Еськин В. Н. Формирование высокопродуктивных агроценозов кормовых культур с использованием адаптивных нетрадиционных растений // Нива Поволжья. 2008. № 3(8). С. 35–39. EDN: JSILNB

5. Ковтунова Н. А., Ковтунов В. В., Шишова Е. А. Оценка урожайности сортов суданской травы разных групп спелости // Аграрный вестник Урала. 2022. № 9(224). С. 13–21. DOI: 10.32417/1997-4868-2022-224-09-13-21. EDN: OOMDZE

6. Платонов А. В., Рассохина И. И., Сухарева Л. В. и др. Продуктивность кормовых трав при использовании микробиологических препаратов в условиях Вологодской области // Кормопроизводство. 2021. № 1. С. 21–25. DOI: 10.25685/KRM.2021.1.2021.001

7. Каменева О. Б., Кибальник О. П., Ефремова И. Г. и др. Сахарное сорго как сахаронос и альтернативный источник биоэнергии (обзор) // АгроЭкоИнфо. 2021. № 5. DOI: 10.51419/20216602

8. Сухарева Л. В. Оценка влияния биопрепаратов на рост и развитие сорговых культур в условиях Вологодской области // АгроЗооТехника. 2021. Т. 4. № 3. DOI: 10.15838/alt.2021.4.3.3

9. Тараненко В. В., Дмитриева И. Г., Муравьев В. С. Разработка регулятора роста для культуры сорго // Земледелие. 2022. № 4. С. 35–39. DOI: 10.24412/0044-3913-2022-4-35-39. EDN: MIERNQ

10. Avdeenko A., Avdeenko S., Domatskiy V., Platonov A. Bacillus subtilis based products as an alternative to agrochemicals // Research on Crops. 2020. Vol. 21. No. 1. Pp. 156–159. DOI: 10.31830/2348–7542.2020.026. EDN: STYTQW

11. Belous N.M., Belchenko S.A., Dronov A.V. et al. Influence of growth regulators on the development and productivity of soybean (*Glycine max* (L.) and sorghum crops (*Sorghum* spp.) // Journal of Critical Reviews. China (Taipei). 2020. Vol. 7. No. 12. Pp. 1925–1935. EDN: XSBQUB

12. Rassokhina I.I., Platonov A.V., Laptev G.Y., Bolshakov V.N. Morphophysical reaction of *Hordeum vulgare* to the influence of microbial preparations // Regulatory Mechanisms in Biosystems. 2020. Vol. 11. No. 2. Pp. 220–225. DOI: 10.15421/022032

REFERENCES

1. On the approval of the Food Security Doctrine of the Russian Federation: Decree of the President of the Russian Federation No. 20 dated 01/21/2020 [Electronic resource]. Access mode: URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/73338425/#review>. (In Russian)

2. Vaskina T.I., Dronov A.V., Belchenko S.A. Substantiation of the use of growth bioregulators in the cultivation of sugar sorghum in the agro-landscape conditions of the Bryansk region. *Vestnik Bryanskoy GSKHA* [Bulletin of the Bryansk Agricultural Academy]. 2024. No. 1(101). Pp. 29–33. (In Russian)

3. Vasilchenko M.Ya., Trifonova E.N. The state and prospects of strategic development of the dairy-productive complex in the regions of the Russian Federation unfavorable for agriculture. *Regional'nyye osobennosti upravleniya razvitiyem agroproduktov'stvennogo kompleksa* [Regional features of management of the development of the agro-food complex]. 2020. No. 2. Pp. 70–85. EDN: LMDBBN. (In Russian)
4. Kshnikatkina A.N., Eskin V.N. Formation of highly productive agrocenoses of forage crops using adaptive non-traditional plants. *Niva Povolzh'ya* [Niva of the Volga region]. 2008. No. 3(8). Pp. 35–39. EDN: JSILHB. (In Russian)
5. Kovtunova N.A., Kovtunov V.V., Shishova E.A. Assessment of the yield of varieties of Sudanese grass of different ripeness groups. *Agrarnyy vestnik Urala* [Agrarian Bulletin of the Urals]. 2022. No. 09(224). Pp. 13–21. DOI: 10.32417/1997-4868-2022-224-09-13-21. EDN: OOMDZE. (In Russian)
6. Platonov A.V., Rassokhina I.I., Sukhareva L.V. et al. Productivity of forage grasses when using microbiological preparations in the Vologda region. *Kormoproizvodstvo* [Feed production]. 2021. No. 1. Pp. 21–25. DOI: 10.25685/KRM.2021.1.2021.001. (In Russian)
7. Kameneva O.B., Kibalnik O.P., Efremova I.G. and others. Sugar sorghum as a sugar-bearing and alternative source of bioenergy (review). *AgroEcoInfo*. 2021. No. 5. DOI: 10.51419/20216602. (In Russian)
8. Sukhareva L.V. Assessment of the effect of biological products on the growth and development of sorghum crops in the Vologda region. *AgroZooTekhnika*. 2021. Vol. 4. No. 3. DOI: 10.15838/alt.2021.4.3.3. (In Russian)
9. Taranenko V.V., Dmitrieva I.G., Muravyev V.S. Development of a growth regulator for sorghum culture. *Zemledeliye* [Agriculture]. 2022. No. 4. Pp. 35–39. DOI: 10.24412/0044-3913-2022-4-35-39. EDN: MIERNQ. (In Russian)
10. Avdeenko A., Avdeenko S., Domatskiy V., Platonov A. *Bacillus subtilis* based products as an alternative to agrochemicals. *Research on Crops*. 2020. Vol. 21. No. 1. Pp. 156–159. DOI: 10.31830/2348–7542.2020.026. EDN: STYTQW
11. Belous N.M., Belchenko S.A., Dronov A.V. et al. Influence of growth regulators on the development and productivity of soybean (*Glycine max* (L.) and sorghum crops (*Sorghum* spp.). *Journal of Critical Reviews*. China (Taipei). 2020. Vol. 7. No. 12. Pp. 1925–1935. EDN: XSBQUB
12. Rassokhina I.I., Platonov A.V., Laptev G.Y., Bolshakov V.N. Morphophysical reaction of *Hordeum vulgare* to the influence of microbial preparations. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*. 2020. Vol. 11. No. 2. Pp. 220–225. DOI: 10.15421/022032

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Financing. The study was conducted without sponsorship.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Вклад авторов:

О. Д. Качаров – закладка и выполнение полевых опытов, сбор данных, анализ данных и их интерпретация, подготовка рукописи;

М. Р. Мусаев – финальная доработка текста статьи.

Contribution of the authors:

O.D. Kacharov – laying and performing field experiments, data collection, data analysis and interpretation, preparation of the manuscript;

M.R. Musaev – final revision of the text of the article.

Информация об авторах

Качаров Олег Дмитриевич, соискатель кафедры землеустройства и кадастров, Дагестанский государственный аграрный университет имени М. М. Джамбулатова;

367032, Россия, г. Махачкала, ул. Магомета Гаджиева, 180;

mouravova@list.ru

Мусаев Магомед Расулович, д-р биол. наук, профессор, зав. кафедрой землеустройства и кадастров, Дагестанский государственный аграрный университет имени М. М. Джамбулатова;

367032, Россия, г. Махачкала, ул. Магомета Гаджиева, 180;

musaev5858@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5930-3170-2086>, SPIN-код: 8010-9719

Information about the authors

Oleg D. Kacharov, Applicant of the Department of Land Management and Cadastre, Dagestan State Agrarian University named after M.M. Dzhambulatov;

367032, Russia, Makhachkala, 180 Magomet Gadzhiev street;

mouravova@list.ru

Magomed R. Musaev, Doctor of Biological Sciences, Professor, Head of the Department of Land Management and Cadastre, Dagestan State Agrarian University named after M. M. Dzhambulatov;

367032, Russia, Makhachkala, 180 Magomet Gadzhiev street;

musaev5858@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5930-3170-2086>, SPIN-code: 8010-9719

УДК 631.416.2:631.584(470.63)

Научная статья

DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-2-130-138

EDN: SOFPUM

Динамика запасов фосфора в почве в связи с интенсивным использованием пашни

М. С. Сидакова, Е. М. Егорова, Р. А. Тиев, А. Ю. Кишев✉

Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова
360030, Россия, г. Нальчик, пр-т Ленина, 1в

Аннотация. В статье приведены результаты исследований по одной из самых актуальных проблем – динамика запасов фосфора в почве в условиях интенсивного использования пашни, в том числе основные факторы, влияющие на изменение содержания фосфора, включая агротехнические практики, внесение удобрений, эрозию почвы и биологическую активность. Цель исследования – определить динамику запасов фосфора в почве в связи с интенсивным использованием пашни. Научная новизна заключается в том, что особое внимание уделено последствиям длительного земледелия для фосфорного баланса и плодородия почв. Закладка опытов, наблюдения и учеты выполнялись по методике, принятой в агрономии. В результате исследований важно отметить, что содержание фосфора на этот срок под люцерной соответствует содержанию P_2O_5 под пожнивными однолетними культурами. В 10–40-сантиметровом слое почвы содержание фосфора оказывается практически равным под всеми культурами и черным паром, но на 23–12 % меньше по сравнению с полем, подвергающимся полупаровой обработке. А в 40–100 см слое почвы выравнивается содержание P_2O_5 под люцерной, черным паром, зябью и оказывается на 14–28 % меньше по сравнению с пожнивными посевами однолетних культур, т. е. наблюдается обратная картина по сравнению с вышележащими слоями почвы, что обусловливается перераспределяющей ролью корневой системы и разложением поживно-корневых остатков. А относительно исследований по динамике P_2O_5 в зависимости от способа использования пашни и предшественников под вика-ржаной смесью важно отметить, что мощно развитая корневая система люцерны повышает подвижность фосфатов. В анализируемый период только корневая система люцерны в 40–100 см слое почвы поддерживает активность фосфора. В полях, не занятых растениями, фосфор связывается в малоподвижные формы. Аналогичная картина характерна для всего метрового слоя почвы. По результатам проведенных исследований можно сказать, что фосфор, входящий в состав поживно-корневых остатков ранее произрастающих на поле культур, застрахован от возможных превращений в почве и подобно содержащемуся в навозе легко доступен к этому времени новому поколению растений (озимым – основным и промежуточным, кукурузе и т. д.). Поэтому удержание N, P_2O_5 , K_2O и других макро- и микроэлементов из удобрений и почвы в поживно-корневых остатках растений представляет, хотя и известное, но по-настоящему активно еще не используемое явление.

Ключевые слова: запасы фосфора, почва, пашня, динамика накопления, севообороты, обработка почвы, удобрения, пожвные культуры

Поступила 06.02.2025, одобрена после рецензирования 28.02.2025, принята к публикации 06.03.2025

Для цитирования. Сидакова М. С., Егорова Е. М., Тиев Р. А., Кишев А. Ю. Динамика запасов фосфора в почве в связи с интенсивным использованием пашни // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2025. Т. 27. № 2. С. 130–138. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-2-130-138

Dynamics of phosphorus reserves in the soil due to intensive use of arable land

M.S. Sidakova, E.M. Egorova, R.A. Tiev, A.Yu. Kishev✉

Kabardino-Balkarian State Agricultural University named after V.M. Kokov
360030, Russia, Nalchik, 1v Lenin avenue

Abstract. The article presents the results of research on one of the most pressing problems – the study of the dynamics of phosphorus reserves in the soil under conditions of intensive use of arable land, including the main factors influencing the change in phosphorus content, including agrotechnical practices, fertilization, soil erosion and biological activity. The purpose of the study is to determine the dynamics of phosphorus reserves in the soil due to intensive use of arable land. The scientific novelty lies in the fact that special attention is paid to the effects of long-term agriculture on phosphorus balance and soil fertility. The experiments, observations and records were carried out according to the methodology adopted in agronomy. As a result of research, it is important to note that the phosphorus content for this period under alfalfa corresponds to the content of P_2O_5 under annual crop crops. In a 10–40 cm soil layer, the phosphorus content turns out to be almost equal under all crops and black steam, but 23–12% less than in a field undergoing semi-steam treatment. In the 40–100 cm soil layer, the P_2O_5 content is leveled under alfalfa, black fallow, and chilly and is 14–28% less than in crop crops of annual crops, i.e. the opposite pattern is observed compared to the overlying soil layers, which is due to the redistributing role of the root system and the decomposition of crop and root residues. And according to the dynamics of P_2O , depending on the method of using arable land and its precursors under the rye mixture, it can be said that the powerfully developed alfalfa root system increases the mobility of phosphates. During the analyzed period, only the alfalfa root system in the 40–100 cm soil layer supports phosphorus activity. In fields unoccupied by plants, phosphorus binds to sedentary forms. A similar pattern is typical for the entire meter-high soil layer. According to the results of the conducted research, it can be said that phosphorus, which is part of the crop and root residues of crops previously growing in the field, is insured against possible transformations in the soil and, like contained in manure, is easily accessible by this time to a new generation of plants (winter – basic and intermediate, corn and Therefore, the retention of N, P_2O_5 , K_2O and other macro- and microelements from fertilizers and soil in the crop-root sediments of plants is a well-known phenomenon, but not yet actively used.

Keywords: phosphorus reserves, soil, arable land, accumulation dynamics, crop rotations, tillage, fertilizers, stubble crops

Submitted 06.02.2025,

approved after reviewing 28.02.2025,

accepted for publication 06.03.2025

For citation. Sidakova M.S., Egorova E.M., Tiev R.A., Kishev A.Yu. Dynamics of phosphorus reserves in the soil due to intensive use of arable land. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2025. Vol. 27. No. 2. Pp. 130–138. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-2-130-138

ВВЕДЕНИЕ

В решении продовольственной программы важное место отводится интенсивному использованию пашни посредством сочетания однолетних основных и промежуточных культур, выращивания многолетних трав в условиях достаточного увлажнения и при орошении путем исключения из севооборотов межкультурных периодов в виде зяби, пара [1, 2, 3].

Интенсивное использование пашни по-своему влияет на динамику запасов и режим элементов питания, о чем в свое время нами было сообщено. Что касается фосфатного режима почвы, то предлагаемые материалы являются оригинальными [4, 5].

Мицеллярно-карбонатные черноземы Северного Кавказа отличаются пониженным содержанием доступного фосфора, и сельскохозяйственные культуры, выращиваемые на них, эффективно реагируют на внесение фосфорных удобрений [6, 7]. Это требует тщательного изучения процессов, связанных с расходом фосфора в севооборотах, насыщенных различными культурами – зерновыми, техническими, кормовыми, возделываемыми в основных и промежуточных посевах.

Поля, не занятые культурами, не только не способствуют накоплению доступных фосфатов, но даже имеют тенденцию к снижению их содержания, особенно в осенне-зимне-весенний период, совпадающий с отсутствием в почве живой корневой системы и энергетического материала в виде пожнивно-корневых остатков [8, 9]. Количество же фосфора, поступающего в почву в севообороте, помимо вносимого с удобрениями, определяется размерами накопления растительных остатков, которые в первые 2–3 месяца после запашки минерализуются на 60–70 % [10, 11]. Следовательно, за счет оставшегося количества пожнивно-корневых остатков нельзя ожидать увеличения содержания доступных фосфатов в названный выше период [12].

Цель исследования – определить динамику запасов фосфора в почве в связи с интенсивным использованием пашни.

Задача исследования. Исходя из изложенного, мы поставили задачу изучить динамику запасов P_2O_5 в связи с различным использованием пашни в севооборотах на предкавказских мицеллярно-карбонатных черноземах. Научная новизна заключается в том, что особое внимание уделено последствиям длительного земледелия для фосфорного баланса и плодородия почв.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Детальное описание методики – программы исследований, почвы опытного участка, удобрения сельскохозяйственных культур в севооборотах, методы аналитических исследований – приводится в ранее опубликованных работах. Содержание P_2O_5 в почве определяли по Б. П. Мачигину. На каждый гектар независимо от интенсивности использования пашни в севообороте вносили по 60 кг суперфосфата (P_2O_5).

При уборке озимой пшеницы, предшествующей посевам пожнивных культур, независимо от способа использования пашни в севообороте (интенсивное, общепринятое) содержание P_2O_5 оказывается практически равным.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В промежуток обработки почвы – посев пожнивных культур (очень короткий) также не происходит существенных изменений в содержании доступного растениям фосфора. Поэтому в межфазный период посев – всходы пожнивных культур 0–10-сантиметровый слой почвы, в который непосредственно заделываются семена, обеспечен равным количеством P_2O_5 , за исключением пара черного (табл. 1).

Содержание фосфора на этот срок под люцерной соответствует содержанию P_2O_5 под пожнивными однолетними культурами. Сказывается способ использования пашни. В 10–40 см слое почвы содержание фосфора оказывается практически равным под всеми

культурами и черным паром, но на 23–12 % меньше по сравнению с полем, подвергающимся полупаровой обработке. В 40–100 см слое почвы выравнивается содержание P_2O_5 под люцерной, черным паром, зябью и оказывается на 14–28 % меньше по сравнению с пожнивными посевами однолетних культур, т. е. наблюдается обратная картина по сравнению с вышележащими слоями почвы, что обусловливается перераспределяющей ролью корневой системы и разложением поживно-корневых остатков.

Таблица 1. Динамика P_2O_5 (кг/га) в зависимости от способа использования пашни в севообороте при орошении

Table 1. Dynamics of P_2O_5 (kg/ha) depending on the method of using arable land in crop rotation under irrigation

Сроки отбора почвы	Глубина отбора, см	Культура					
		кукуруза*	суданская трава*	гречиха*	люцерна*	зябь (контроль)	черный пар
Посев-всходы	0–10	14	13	14	13	15	21
	10–40	39	40	39	43	48	37
	40–100	41	40	41	36	35	32
	0–100	94	93	94	92	98	90
Всходы 5–7 листьев	0–10	16	113	16	17	20	22
	10–40	35	31	35	37	36	37
	40–100	37	34	38	31	25	31
	0–100	82	78	89	85	81	90
Уборка	0–10	16	10	16	18	19	22
	10–40	32	26	32	30	32	40
	40–100	45	32	45	51	37	36
	0–100	93	68	93	99	88	98

Примечание: культура выращивается в поживных посевах. Ранняя зябь подвергается полупаровой обработке.

Отмеченные особенности формирования фосфатного режима по горизонтам почвы в связи со способом использования пашни не отражаются на запасах фосфора в метровом слое почвы.

Корневые системы однолетних культур в 0–10 см слое почвы, за исключением суданской травы, переводят в доступное состояние такое количество фосфора, которого достаточно для питания растений и содержания его в почве всего на 32–24 % меньше по сравнению с полями, на которых отсутствует растительность. Особенно активна корневая система в 10–40 см слое почвы, а в 40–100 см слое почвы содержание фосфора под однолетними поживными культурами и люцерной оказывается равным или даже больше, чем в пару черном и на поле, обрабатываемом по типу полупара. Аналогичная картина складывается в уборку поживных культур, совпадающую со сроками сева озимых промежуточных культур в севооборотах с интенсивным использованием пашни. Исключение представляет поле из-под суданской травы.

После уборки поживных культур в севообороте с интенсивным использованием пашни высеваются озимые промежуточные культуры (вика + рожь**), а в севообороте с общепринятым – после полупаровой обработки почвы – переходит в зябь до посева основных яро-

вых культур. Разрыв между уборкой пожнивных и посевом озимых промежуточных культур сводится до минимума с тем, чтобы уложиться в оптимальные сроки посева озимых (до 10–15.10). В период от уборки пожнивных до посева озимых промежуточных культур, независимо от способа использования пашни в севообороте, содержание P_2O_5 в посевном слое почвы (0–10 см) выравнивается и достигает в зависимости от предшественников 11–16 мг/кг почвы (табл. 2).

Таблица 2. Динамика P_2O_5 (кг/га) в зависимости от способа использования пашни и предшественников под вика-ржаной** смесью

Table 2. Dynamics of P_2O_5 (kg/ha) depending on the method of using arable land and predecessors under a vetch-rye** mixture

Сроки отбора почвы	Глубина отбора, см	Предшественники						
		кукуруза*	суданская трава*	гречиха*	зябь (контроль)	люцерна*	зябь (контроль)	черный пар
Посев-всходы	0–10	16	11	16	14	11	17	20
	10–40	33	29	33	31	39	39	35
	40–100	35	36	35	33	62	35	35
	0–100	84	76	84	78	112	91	90
Весеннее отрастание	0–10	23	13	23	22	22	19	20
	10–40	43	42	43	45	43	43	36
	40–100	49	48	49	51	51	57	59
	0–100	115	103	115	118	116	119	115
Выход в трубку	0–10	22	16	21	12	24	20	21
	10–40	44	43	44	38	49	39	30
	40–100	43	45	55	42	44	47	52
	0–100	109	104	120	82	117	106	103
Уборка	0–10	17	13	17	14	23	19	22
	10–40	37	41	37	38	46	41	33
	40–100	43	44	52	40	33	53	54
	0–100	97	106	106	82	102	113	109

Примечания: * – полупаровая обработка почвы в севообороте с интенсивным использованием пашни; ** – полупаровая обработка почвы в севообороте с общепринятым использованием машин.

Следовательно, интенсивная обработка почвы в укороченные сроки подготовки не оказывает существенного влияния на содержание фосфора в почве. Мощно развитая корневая система люцерны повышает подвижность фосфатов. В 10–40 см слое почвы четко просматривается положительное последствие корневых систем однолетних пожнивных культур, особенно люцерны; не изменяется содержание фосфора в поле, обрабатываемом по типу полупара, и достоверно уменьшается в черном пару. В анализируемый период только корневая система люцерны в 40–100 см слое почвы поддерживает активность фосфора. В полях, не занятых растениями, фосфор связывается в малоподвижные формы. Аналогичная картина характерна для всего метрового слоя почвы (табл. 1, 2).

С появлением мощно развитой корневой системы (весеннее отрастание) во всех полях, занятых растениями, отмечается резкое увеличение содержания фосфора в 0–10 см слое почвы и неизменными остаются запасы в зяби и черном пару. Аналогичная картина наблю-

дается по всему метровому слою почвы. Это происходит под влиянием разложения повышенных количеств пожнивно-корневых остатков в севообороте с интенсивным использованием пашни, активной деятельности живых корней, особенно бобовых культур, увеличения степени подвижности за счет систематического применения фосфорных удобрений. В зяби и черном пару отмечено перемещение P_2O_5 в глубокие слои почвы.

В условиях Северного Кавказа в зимний период отмечаются частые оттепели. Следовательно, попеременное высушивание и увлажнение почвы в сочетании с промораживанием повышают подвижность адсорбированных ее ионов фосфатов на протяжении всего осенне-зимне-ранневесеннего периода. Еще более активно протекают эти процессы в годы, когда озимые (зимующие) культуры не прекращают вегетацию и в зимний период. Озимые промежуточные (вика–рожь**), люцерна, подсушивая почву по сравнению с черным паром и зябью в севообороте с общепринятым использованием пашни, несмотря на постоянное поглощение фосфора, резко повышают подвижность фосфорнокислых солей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных исследований можно сказать, что фосфор, входящий в состав пожнивно-корневых остатков ранее произрастающих на поле культур (озимой пшеницы, кукурузы и других), застрахован от возможных превращений в почве и подобно содержащемуся в навозе легко доступен к этому времени новому поколению растений (озимым – основным и промежуточным, кукурузе и т. д.). Поэтому удержание N, P_2O_5 , K_2O и других макро- и микроэлементов из удобрений и почвы в пожнивно-корневых остатках растений представляет, хотя и известное, но по-настоящему активно еще не используемое явление.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Хакимов Ш. З.* Влияние динамики NPK на дозы внесения минеральных удобрений под озимую пшеницу // Плодородие. 2021. № 5. С. 56–61. DOI: 10.25680/S19948603.2021.122.14
2. *Налиухин А. Н., Демидов Д. В.* Мировые запасы фосфатных руд и научно обоснованная потребность в фосфорных удобрениях в России // Плодородие. 2024. № 2. С. 46–50. DOI: 10.25680/S19948603.2024.137.12
3. *Тутукова Д. А., Кишев А. Ю., Жеруков Т. Б.* Особенности применения микроэлементов в сельскохозяйственном производстве // Успехи современного естествознания. 2019. № 6. С. 18–22.
4. *Щепетьев М. А.* Влияние жидких и твердых азотно-фосфорных удобрений на продуктивность озимой пшеницы // Инженерный вестник Дона. 2012. № 4–2 (23). С. 54.
5. *Ханиева И. М., Кишев А. Ю., Жеруков Т. Б., Мамаев К. Б.* Способы и приемы повышения почвенного плодородия // Уральский научный вестник. 2017. Т. 10. № 3. С. 042–044.
6. *Рудой Н. Г.* Градации подвижных фосфатов в почвах средней Сибири // Вестник КрасГАУ. 2014. № 5(92). С. 69–72.
7. *Шогенов Ю. М., Бозиев А. Л.* Эффективность применения удобрений под кукурузу в условиях предгорной и степной зон Кабардино-Балкарии // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова. 2024. № 1(43). С. 7–16.

8. Рамазанова С. Б., Айтбаев Т. Е., Калдыбаев С., Малимбаева А. Д. Изменение содержания валового, органического и минерального фосфора в каштановых почвах при длительном и систематическом применении удобрений в севооборотах // Почвоведение и агрохимия. 2013. № 1. С. 83–85.
9. Аканова Н. И., Холомьева Л. Н. Эффективность применения фосфогипса под озимую пшеницу на дерново-подзолистых почвах // Евразийский союз ученых. М., 2023. № 10(108). С. 15–21.
10. Кучмасов Д. Ю., Левин Б. В., Литус А. А., Котельникова И. С. и др. Эффективное и разностороннее применение фосфогипса в сельском хозяйстве // В сборнике: Роль мелиорации земель в реализации государственной научно-технической политики в интересах устойчивого развития сельского хозяйства. Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 50-летию Всероссийского научно-исследовательского института орошаемого земледелия. Волгоград, 2017. С. 121–136.
11. Рахимов М. А. У. Влияние методов применений фосфорных удобрений на урожайность озимой пшеницы // В сборнике: OPEN INNOVATION. Сборник статей VIII Международной научно-практической конференции. Пенза, 2019. С. 75–77.
12. Алтысбаев А. У., Сапаров А. С., Сулейменов Б. У. Влияние фосфорных удобрений на урожайность пшеницы // Почвоведение и агрохимия. 2016. № 1. С. 73–78.

REFERENCES

1. Khakimov Sh.Z. Influence of NPK dynamics on the application rates of mineral fertilizers for winter wheat. *Plodorodiye* [Plodorodie]. 2021. No. 5. Pp. 56–61. DOI: 10.25680/S19948603.2021.122.14. (In Russian)
2. Naliukhin A.N., Demidov D.V. World reserves of phosphate ores and scientifically substantiated need for phosphorus fertilizers in Russia. *Plodorodiye* [Plodorodie]. 2024. No. 2. Pp. 46–50. DOI: 10.25680/S19948603.2024.137.12. (In Russian)
3. Tutukova D.A., Kishev A.Yu., Zherukov T.B. Features of the use of microelements in agricultural production. *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya* [Advances in modern natural science]. 2019. No. 6. Pp. 18–22. (In Russian)
4. Shchepetyev M.A. The influence of liquid and solid nitrogen-phosphorus fertilizers on the productivity of winter wheat. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don]. 2012. No. 4–2(23). P. 54. (In Russian)
5. Khanieva I.M., Kishev A.Yu., Zherukov T.B., Mamaev K.B. Methods and techniques for increasing soil fertility. *Ural'skiy nauchnyy vestnik* [Ural Scientific Bulletin]. 2017. Vol. 10. No. 3. Pp. 042–044. (In Russian)
6. Rudoy N.G. Gradations of mobile phosphates in soils of central Siberia. *Vestnik KrasGAU* [Bulletin of KrasSAU]. 2014. No. 5(92). Pp. 69–72. (In Russian)
7. Shogenov Yu.M., Boziev A.L. Efficiency of fertilizer application for corn in the foothill and steppe zones of Kabardino-Balkaria. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta im. V.M. Kokova* [Izvestiya of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov]. 2024. No. 1(43). Pp. 7–16. (In Russian)
8. Ramazanova S.B., Aitbaev T.E., Kaldybaev S., Malimbaeva A.D. Changes in the content of gross, organic and mineral phosphorus in chestnut soils with long-term and systematic application of fertilizers in crop rotations. *Pochvovedeniye i agrokhiymiya* [Soil Science and Agrochemistry]. 2013. No. 1. Pp. 83–85. (In Russian)

9. Akanova N.I., Kholomyeva L.N. Efficiency of phosphogypsum application under winter wheat on sod-podzolic soils. *Yevraziyskiy soyuz uchenykh* [Eurasian Union of Scientists]. Moscow, 2023. No. 10(108). Pp. 15–21. (In Russian)

10. Kuchmasov D.Yu., Levin B.V., Litus A.A., Kotelnikova I.S. et al. *Effektivnoye i raznostoronneye primeneniye fosfogipsa v sel'skom khozyaystve* [Effective and versatile use of phosphogypsum in agriculture]. In the collection: *Rol' melioratsii zemel' v realizatsii gosudarstvennoy nauchno-tekhnicheskoy politiki v interesakh ustoychivogo razvitiya sel'skogo khozyaystva* [The role of land reclamation in the implementation of state scientific and technical policy in the interests of sustainable development of agriculture]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 50-letiyu Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta oroshayemogo zemledeliya*. Volgograd, 2017. Pp. 121–136. (In Russian)

11. Rakhimov M.A.U. *Vliyaniye metodov primeneniya fosfornykh udobreniy na urozhaynost' ozimoy pshenitsy* [Influence of phosphorus fertilizer application methods on winter wheat yield]. In the collection: *OPEN INNOVATION. Sbornik statey VIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Collection of articles of the VIII International scientific and practical conference]. Penza, 2019. Pp. 75–77. (In Russian)

12. Alpysbaev A.U., Saparov A.S., Suleimenov B.U. Influence of phosphorus fertilizers on wheat yield. *Pochvovedeniye i agrokhimiya* [Soil Science and Agrochemistry]. 2016. No. 1. Pp. 73–78. (In Russian)

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Информация об авторах

Сидакова Маргарита Сарабиевна, канд. с.-х. наук, доцент, Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова;

360030, Россия, г. Нальчик, пр-т Ленина, 1в;

sidakova.53@mail.ru

Егорова Елена Михайловна, канд. с.-х. наук, доцент кафедры агрономии, Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова;

360030, Россия, г. Нальчик, пр-т Ленина, 1в;

conf200606@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9559-4608>, SPIN-код: 1914-0691

Тиев Руслан Абдулович, канд. биол. наук, доцент, Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова;

360030, Россия, г. Нальчик, пр-т Ленина, 1в;

Кишев Алим Юрьевич, канд. с.-х. наук, доцент, Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова;

360030, Россия, г. Нальчик, пр-т Ленина, 1в;

a.kish@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2838-6876>, SPIN-код: 2237-8388

Information about the authors

Margarita S. Sidakova, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Kabardino-Balkarian State Agricultural University named after V.M. Kokov;

360030, Russia, Nalchik, 1v Lenin avenue;

sidakova.53@mail.ru

Elena M. Egorova, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Agronomy, Kabardino-Balkarian State Agricultural University named after V.M. Kokov;

360030, Russia, Nalchik, 1v Lenin avenue;

conf200606@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9559-4608>, SPIN-code: 1914-0691

Ruslan A. Tiev, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Kabardino-Balkarian State Agricultural University named after V.M. Kokov;

360030, Russia, Nalchik, 1v Lenin avenue;

Alim Yu. Kishiev, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Acting Head of the Department of Agronomy, Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov;

360030, Russia, Nalchik, 1v Lenin avenue;

a.kish@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2838-6876>, SPIN-code: 2237-8388

УДК 631.5:635.751(470.621)

DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-2-139-149

EDN: UMSKUL

Научная статья

Особенности роста, развития и формирования урожайности сортов кориандра

Ж. А. Шаова✉, В. Н. Косарев, М. С. Галичева

Майкопский государственный технологический университет
385000, Россия, г. Майкоп, ул. Первомайская, 191

Аннотация. В статье рассматриваются особенности роста, развития и формирования урожайности различных сортов кориандра, выращиваемых в условиях Гиагинского района Республики Адыгея. Проведен сравнительный анализ агроклиматических условий региона, влияющих на вегетационный период растений, и изучены адаптационные способности выбранных сортов к местным почвенно-климатическим условиям. Особое внимание уделено факторам, определяющим продуктивность кориандра, таким как сроки посева, удобрение почвы и борьба с сорняками. Представлены результаты полевых экспериментов, демонстрирующие различия в темпах роста, развитии вегетативной массы и формировании урожая семян у исследуемых сортов. Сделаны выводы о перспективности выращивания определенных сортов кориандра в данном регионе и предложены рекомендации по оптимизации агротехнических мероприятий для повышения урожайности этой культуры. В 2019–2021 годах в условиях Гиагинского района Республики Адыгея проводились исследования по агротехнике выращивания сортов кориандра Силач и Янтарь. Были изучены нормы высева и сроки посева, влияющие на урожайность и качество плодов. Анализ диаметра плодов выявил различия между сортами: диаметр плодов сорта Силач составил 3,4–3,6 мм, тогда как у сорта Янтарь – 3,8–4,0 мм. Цвет плодов также отличался: у Силача – коричнево-золотистый, у Янтаря – темно-коричневый. По содержанию эфирного масла сорт Янтарь превосходил Силач, составляя 2,2 % против 1,9 %. Средняя урожайность плодов Силача оказалась выше – 3,0 т/га по сравнению с 2,5 т/га у Янтаря. Урожайность зеленой массы у обоих сортов была значительной, однако Янтарь демонстрировал большую продуктивность (21,29 т/га), чем Силач (12,33 т/га).

Ключевые слова: кориандр, сорт, плоды, сроки посева, урожайность, эфирное масло, экономическая эффективность, энергетическая оценка, Республика Адыгея, адаптивность

Поступила 20.09.2024, одобрена после рецензирования 12.12.2024, принята к публикации 04.03.2025

Для цитирования. Шаова Ж. А., Косарев В. Н., Галичева М. С. Особенности роста, развития и формирования урожайности сортов кориандра // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2025. Т. 27. № 2. С. 139–149. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-2-139-149

Original article

Features of growth, development and yield formation of coriander varieties

Z.A. Shaova✉, V.N. Kosarev, M.S. Galicheva

Maikop State Technological University
385000, Russia, Maikop, 191 Pervomayskaya street

Abstract. The article examines the growth, development, and yield formation of various coriander varieties cultivated in the conditions of the Giaginsky district of the Republic of Adygea. A comparative analysis of the agroclimatic conditions of the region affecting the vegetation period of plants was conducted, and the adaptive capabilities of selected varieties to local soil and climatic conditions were studied. Particular attention is paid to factors determining coriander productivity, such as sowing dates, irrigation regime, soil fertilization, and weed control. The results of field experiments demonstrating differences in growth rates, vegetative mass development, and seed yield formation among the studied varieties are presented. Conclusions are drawn about the prospects for growing certain coriander varieties in this region, and recommendations are made to optimize agronomic practices to increase crop yields. In 2019–2021, research on the cultivation techniques of the coriander varieties Silach and Yantar was carried out in the Giaginsky district of the Republic of Adygea. Seeding norms and sowing dates influencing fruit yield and quality were examined. Analysis of fruit diameter revealed differences between the varieties: Silach fruits measured 3.4–3.6 mm, while Yantar fruits reached 3.8–4.0 mm. Fruit color also varied: Silach had a brownish-golden hue, whereas Yantar exhibited a dark-brown shade. In terms of essential oil content, Yantar surpassed Silach, with 2.2% versus 1.9%. The average fruit yield of Silach was higher at 3.0 t/ha compared to 2.5 t/ha for Yantar. Both varieties demonstrated significant green biomass yields, but Yantar showed greater productivity (21.29 t/ha) than Silach (12.33 t/ha).

Keywords: coriander, variety, fruits, sowing time, yield, essential oil, economic efficiency, energy assessment, Republic of Adygea, adaptability

Submitted 20.09.2024,

approved after reviewing 12.12.2024,

accepted for publication 04.03.2025

For citation. Shaova Z.A., Kosarev V.N., Galicheva M.S. Features of growth, development and yield formation of coriander varieties. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2025. Vol. 27. No. 2. Pp. 139–149. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-2-139-149

ВВЕДЕНИЕ

Возрождение культуры кориандра после войны и быстрый рост этой культуры объясняется прежде всего той потребностью, которую предъявила на него государственная промышленность в связи с разрывом связи с границей.

Кориандр вследствие большого содержания в нем эфирного масла всегда высоко ценился на международном рынке, поэтому сбыт его всегда обеспечен [1, 2, 3].

Общая потребность в плодах кориандра выражается в 10,84 тыс. тонн, сюда входит внутреннее потребление и экспорт. Относительно экспорта и импорта сведения очень отрывочные.

За последнее время на рынке с каждым годом все больше и больше увеличивается спрос на жмых (отходы) кориандра.

Знание сортовых особенностей и условий роста является важным фактором для стабилизации урожайности и повышения качества плодов [4, 5, 6]. Урожайность, массовая доля эфирного масла и другие показатели различаются в зависимости от сорта и условий произрастания [7, 8, 9].

Ранние сроки посева обеспечивают лучшее развитие растений, их меньшую поражаемость болезнями и меньшее полегание. В исследованиях, проведенных в Воронежской области на Алексеевской МТС, было установлено, что урожайность плодов кориандра при посеве во второй декаде апреля составила 0,76 т/га, а при посеве в третьей декаде апреля – 0,58 т/га. В. А. Лукьянов рекомендовал перенос срока посева кориандра на 10–14 дней после начала сева ранних яровых зерновых культур [10].

Цели и задачи исследования. Целью исследований являлось изучение особенностей получения высоких урожаев кориандра, задачами исследований послужили факторы сроков посевной, посевных нормативов, интенсивности применения минеральных удобрений, защитно-стимулирующих веществ и других параметров возделывания эфирно-масличных культур.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили на полях ООО «Перспектива+» Гиагинского района Республики Адыгея в 2019–2021 гг. ООО «Перспектива+» расположено в северо-восточной части станции Гиагинской. Почвы опытного участка представлены черноземом выщелоченным уплотненным малогумусным сверхмощным. Мощность гумусового горизонта 115–200 см, содержание разных элементов: калий – 1,5–2 %, фосфор – 0,18–0,22 %, общий азот – 0,25–0,3 %, органическое вещество – 3,0–4,8 %. В слое 0–30 общая влажность 50–53 %. Погодные условия в годы проведения исследований отличались по количеству осадков в течение года и по годам, колебаниями низких и высоких температур, низкой или высокой влажностью воздуха.

Первый год исследования (2019–2020) отличался избыточным увлажнением в сравнении со средней многолетней нормой.

Октябрь был теплым и влажным, что благоприятствовало появлению дружных и ровных всходов кориандра. Так, в октябре осадков выпало 80,0 мм, что на 22,0 мм больше многолетней нормы [11]. Температура воздуха на +2,7°C выше среднемноголетних значений. Ноябрь характеризовался теплой и сухой погодой (рис. 1).

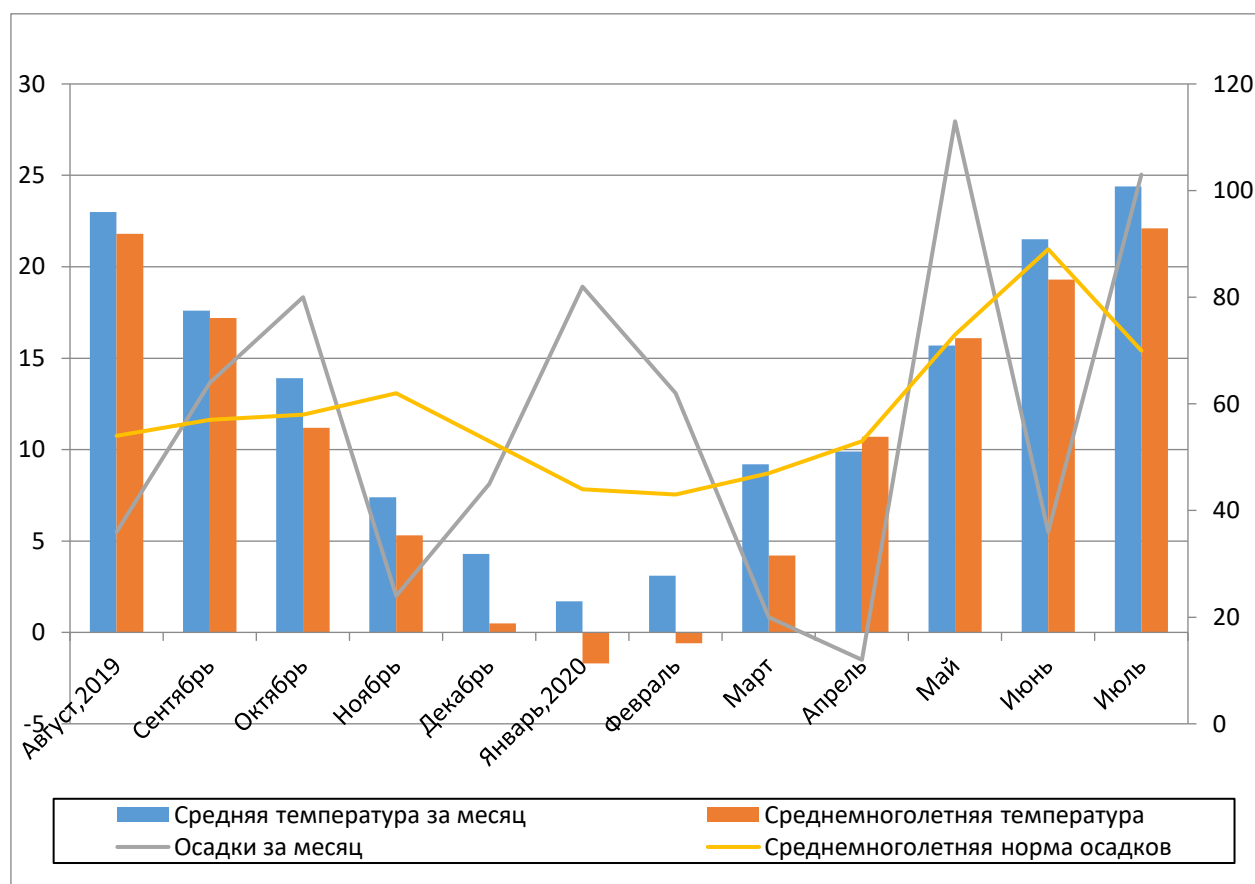


Рис. 1. Условия 2019–2020 сельскохозяйственного года

Fig. 1. Conditions for the 2019–2020 agricultural year

Второй год исследования (2020–2021) был более благоприятным. В условиях южно-предгорной зоны в течение трех осенних месяцев – сентябрь, октябрь и ноябрь 2020 г. – была отмечена сухая и теплая погода (рис. 2).

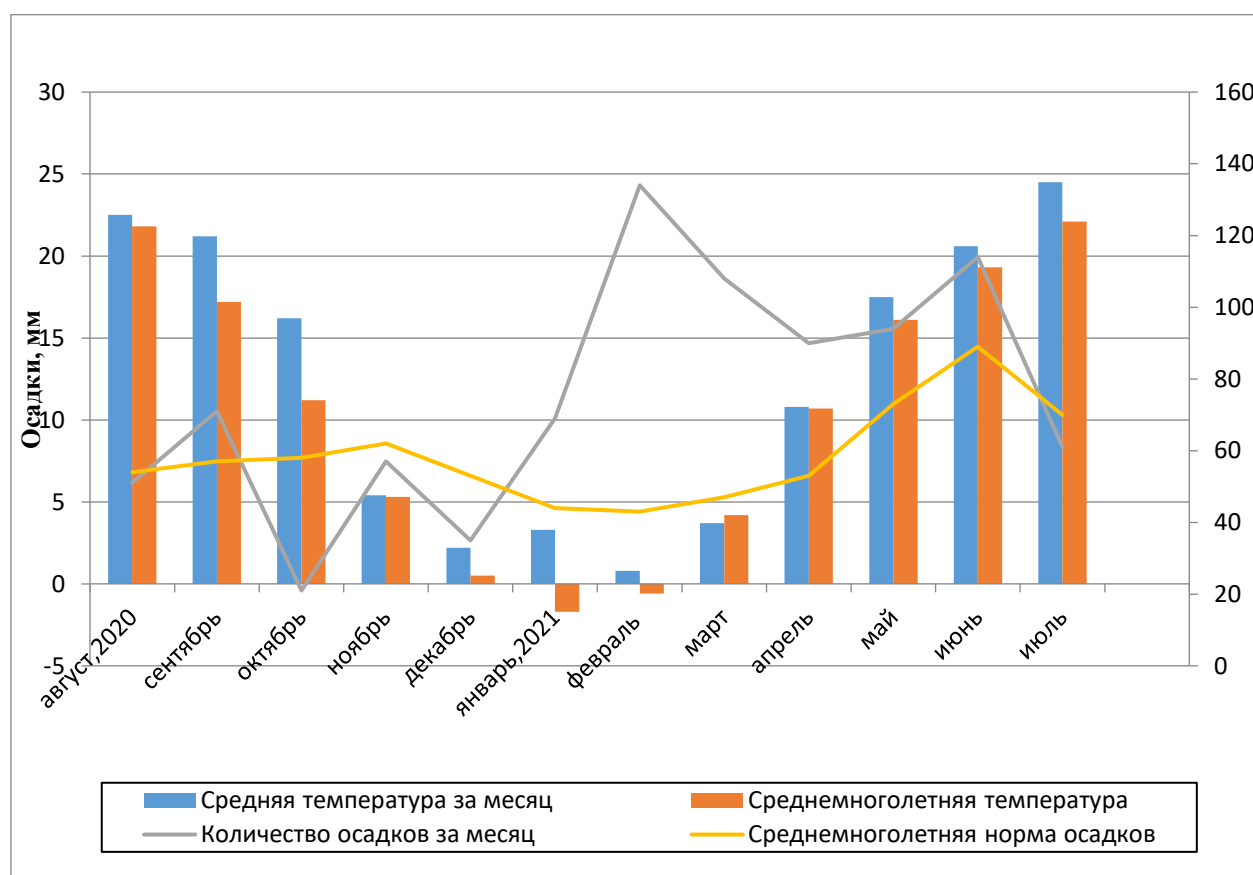


Рис. 2. Условия 2020–2021 сельскохозяйственного года

Fig. 2. Conditions for the 2020–2021 agricultural year

Аномально сухая и теплая погода осенью не способствовала развитию кориандра в этот период. Несмотря на то, что зимний и весенний периоды отличались большим количеством осадков и благоприятным температурным режимом, растения хорошо перезимовали.

Материалом для исследований служили сорта кориандра посевного (*Coriandrum sativum* L.) Янтарь, оригинатором которого является ФГБУН НИИСХ Крыма, районирован в 1976 г., и Силач – ФГБУН «Научно-исследовательский институт Крыма».

Посев производили во все годы исследований в оптимальный срок (первая декада сентября) сеялкой СЗ-4,2. Норма высева 25 кг/га (или 3 млн всхожих семян). Глубина заделки 2–4 см. После сева осуществлялось прикатывание.

Производилось послеуборочное боронование в осенний период бороной СН-8 поперек рядов.

В весенний период осуществлялась подкормка аммиачной селитрой N_{34} в дозе 100 кг/га.



Рис. 3. Сорта кориандра Силач и Янтарь

Fig. 3. Coriander varieties Silach and Yantar

В фазе розетки (первая декада апреля) проводилась химическая обработка посевов растений кориандра. На посевах были применены следующие химические препараты: гербицид «Прометрин» с нормой 3 л/га в смеси с гербицидом «Лемур» 1 л/га, фунгицидная обработка препаратом «Колоссаль», норма 1 л/га. Расход рабочей жидкости – 200 л/га, все химические операции производились опрыскивателем ОП-2500.

Определение степени развития рамуляриоза в фазы развития кориандра: розетка 2–4 настоящих листа, стеблевание, цветение, плодообразование – глазомерно по 6-балльной шкале по методике для эфиромасличных культур (ВНИИЭМК г. Симферополь) на 25 растениях по диагонали делянки по всем вариантам и повторениям. Переработка зеленой массы и плодов кориандра на эфирное масло осуществлялась методом паровой дистилляции [12, 13, 14, 15].

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате проведенных исследований экспериментально подтверждено, что ранние сроки посева способствуют лучшему развитию растений и меньшему поражению болезнями. Урожайность плодов сорта Янтарь была выше в условиях 2021 года благодаря более благоприятным погодным условиям.

Исследования показали, что сорта кориандра реагируют на агротехнические приемы по-разному. Помимо величины урожая, важным фактором является его качество. Условия произрастания оказывают значительное влияние на накопление веществ в плодах и их химический состав [16, 17, 18]. Для максимальной реализации генетического потенциала каждого сорта необходимы знания о специфике его реакции на густоту стояния.

Результаты исследований показали, что урожайность и выход эфирного масла зависят от сорта и агротехнических приемов. Таблица 1 представляет данные по урожайности и выходу эфирного масла у сортов Силач и Янтарь.

Таблица 1. Урожайность зеленой массы и выход эфирного масла (2020–2021 гг.)**Table 1.** Green mass yield and essential oil yield (2020–2021)

Сорт	Урожайность, ц/га (2020)	Урожайность, ц/га (2021)	Средняя урожайность, ц/га	Выход эфирного масла, кг/га (2020)	Выход эфирного масла, кг/га (2021)	Средний выход эфирного масла, кг/га
Силач	22,5	23,0	22,75	61,5	62,0	61,75
Янтарь	16,0	16,5	16,25	35,0	35,5	35,25

Анализ данных показал, что сорт Силач имеет более высокие урожайность и выход эфирного масла по сравнению с сортом Янтарь. В 2020 году урожайность сорта Силач составила 22,5 ц/га, а в 2021 году – 23,0 ц/га. Выход эфирного масла у сорта Силач составил 61,5 кг/га в 2020 году и 62,0 кг/га в 2021 году.

Сорт Янтарь показал меньшую урожайность: 16,0 ц/га в 2020 году и 16,5 ц/га в 2021 году. Выход эфирного масла у сорта Янтарь составил 35,0 кг/га в 2020 году и 35,5 кг/га в 2021 году.

Исследования показали, что нормы посева и сроки высевы оказывают значительное влияние на урожайность и качество плодов кориандра. Таблица 2 представляет данные по урожайности в зависимости от норм посева и сроков высевы.

Таблица 2. Влияние норм посева и сроков высевы на урожайность (2020–2021 гг.)**Table 2.** Impact of sowing rates and sowing dates on yield (2020–2021)

Норма посева, кг/га	Срок высевы	Урожайность, ц/га (2020)	Урожайность, ц/га (2021)	Средняя урожайность, ц/га
25	первая декада сентября	22,5	23,0	22,75
20	первая декада сентября	21,0	21,5	21,25
25	третья декада сентября	16,5	17,0	16,75
20	третья декада сентября	15,0	15,5	15,25

Данные показывают, что наивысшая урожайность была достигнута при норме посева 25 кг/га и сроке высевы в первую декаду сентября. Урожайность при этой норме посева составила 22,5 ц/га в 2020 году и 23,0 ц/га в 2021 году.

Экономическая и энергетическая оценка возделывания кориандра является важным аспектом для определения его рентабельности. Таблица 3 представляет данные по экономической эффективности возделывания сортов Силач и Янтарь.

Таблица 3. Экономическая эффективность возделывания кориандра (2020–2021 гг.)**Table 3.** Economic efficiency of coriander cultivation (2020–2021)

Показатель	Силач (2020)	Силач (2021)	Янтарь (2020)	Янтарь (2021)
Затраты на производство, тыс. руб./га	25,0	26,0	24,0	25,0
Выручка, тыс. руб./га	90,0	92,0	64,0	66,0
Прибыль, тыс. руб./га	65,0	66,0	40,0	41,0

Экономическая эффективность возделывания сортов Силач и Янтарь оценивается на основе затрат на производство и выручки от продажи продукции. В 2020 и 2021 годах затраты на производство сорта Силач составили 25,0 тыс. руб./га и 26,0 тыс. руб./га соответственно, а выручка – 90,0 тыс. руб./га и 92,0 тыс. руб./га. Таким образом, прибыль составила 65,0 тыс. руб./га в 2020 году и 66,0 тыс. руб./га в 2021 году.

Для сорта Янтарь затраты на производство в 2020 году составили 24,0 тыс. руб./га, а в 2021 году – 25,0 тыс. руб./га. Выручка составила 64,0 тыс. руб./га и 66,0 тыс. руб./га соответственно. Прибыль для сорта Янтарь составила 40,0 тыс. руб./га в 2020 году и 41,0 тыс. руб./га в 2021 году.

Эти данные показывают, что возделывание сорта Силач является более прибыльным по сравнению с сортом Янтарь. Высокая прибыль сорта Силач обусловлена его высокой урожайностью и содержанием эфирного масла, что увеличивает выручку от продажи продукции.

Энергетическая оценка возделывания кориандра включает анализ затрат энергии на производство и выхода энергии в виде конечной продукции. Основными источниками затрат энергии являются обработка почвы, внесение удобрений, посев, уход за посевами и уборка урожая [18, 19, 20].

В условиях Республики Адыгея возделывание кориандра требует значительных энергетических затрат на основные операции. Однако выход энергии в виде полученной продукции значительно превышает затраты, что делает возделывание кориандра энергетически эффективным.

Таблица 4. Энергетическая оценка возделывания кориандра (2020–2021 гг.)

Table 4. Energy assessment of coriander cultivation (2020–2021)

Показатель	Силач (2020)	Силач (2021)	Янтарь (2020)	Янтарь (2021)
Затраты энергии, ГДж/га	5,2	5,3	4,8	4,9
Выход энергии, ГДж/га	18,0	18,4	12,8	13,2
Энергетическая эффективность	3,5	3,5	2,7	2,7

Энергетическая эффективность возделывания сорта Силач составляет 3,5, что означает, что на каждую вложенную единицу энергии получено 3,5 единицы энергии в виде конечной продукции. Для сорта Янтарь энергетическая эффективность составляет 2,7. Эти данные свидетельствуют о высокой энергетической эффективности возделывания кориандра, особенно сорта Силач.

В целом экономическая и энергетическая оценка возделывания кориандра подтверждает его высокую рентабельность и целесообразность выращивания в условиях Республики Адыгея.

Выводы

Почвенно-климатические условия Республики Адыгея пригодны для возделывания кориандра на зеленую массу, плоды и семена. Изучаемые сорта кориандра Силач и Янтарь в условиях региона имеют высокую урожайность зеленой массы, плодов и показывают высокую эффективность использования.

Содержание эфирного масла в плодах кориандра сорта Янтарь составляло 2,2 %, сорта Силача – 1,9 %. Содержание эфирного масла в плодах сорта Янтарь достоверно выше в сравнении с сортом Силач.

Урожайность зеленой массы кориандра в почвенно-климатических условиях Республики Адыгея составляет у сорта Силач – 12,33 т/га, сорта Янтарь – 21,29 т/га, выход эфирного масла – 18,77 т/га и 21,29 т/га соответственно.

Затраты совокупной энергии на единицу площади по изучаемым сортам изменяются в небольших пределах и варьируют от 13424 МДж/га (Силач) до 14099 МДж/га (Янтарь). Запасы энергии, накопленные урожаем, превышают затраты на производство зеленой массы кориандра. Коэффициент энергетической эффективности в среднем за два года по всем сортам был невысоким – 1,32, так как сорта характеризуются относительно высокими затратами энергии на производство 1 т зеленой массы.

Установлено, что возделывание кориандра сорта Силач является более прибыльным (60,9–62,5 %) по сравнению с сортом Янтарь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kačániová M., Galovičová L., Ivanišová E. et al. Antioxidant, antimicrobial and antibiofilm activity of coriander (*Coriandrum sativum* L.) essential oil for its application in foods // *Foods*. 2020. No. 9(3). Pp. 282–301. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods9030282>
2. Кароматов И. Д. Кориандр как лечебное средство // *Биология и интегративная медицина*. 2016. № 5. Pp. 122–142. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27638595>. EDN: XGVEYV
3. Цицилин А. Н., Ковалев Н. И., Коротких И. Н. и др. Методика исследований при интродукции лекарственных и эфирномасличных растений. М.: ФГБНУ ВИЛАР, 2022. 64 с. EDN: ELWOOS
4. Прахова Т. Я. Экологические аспекты продуктивности сортов нигеллы в условиях Среднего Поволжья // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2022. № 2. С. 36–40. DOI: 10.31857/S2500262722020077
5. Хмелинская Т. В., Смоленская А. Е., Соловьева А. Е. Комплексная биохимическая характеристика кориандра (*Coriandrum sativum* L.) // *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2021. Т. 182. № 1. С. 80–90. DOI: 10.30901/2227-8834-2021-1-80-90
6. Duwal A., Nepal A., Luitel S. et al. Evaluation of coriander (*Coriandrum sativum* L.) varieties for growth and yield parameters // *Nepalese Journal of Agricultural Sciences*. 2019. Vol. 18. Pp. 36–46. URL: <https://www.researchgate.net/publication/337560937>
7. Степанова Н. Ю. Агробиологическая оценка сортов кориандра в условиях Ленинградской области // *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. 2021. № 4(65). С. 20–27. DOI: 10.24412/2078-1318-2021-4-20-27
8. Nikolaichenko N., Strizhkov N., Azizov Z. et al. The impact of progressive cultivation technology on the productivity of coriander on chernozems of the Lower Volga region // *BIO Web of Conferences*. 2021. No. 37. P. 00141. DOI: 10.1051/bioconf/20213700141
9. Silva M., Soares T., Gheyi H. et al. Hydroponic cultivation of coriander using fresh and brackish waters with different temperatures of the nutrient solution. *Engenharia Agrícola*. 2020. Vol. 40. No. 6. Pp. 674–683. DOI: 10.1590/1809-4430-eng.agric.v40n6p674-683/2020
10. Лукьянов И. А. Эфиромасличные культуры. Кориандр. М.: Издательство сельскохозяйственной литературы, 1953. 243 с.
11. Кинчаров А. И., Дёмина Е. А., Кинчарова М. Н. и др. Методика оценки агроэкологической адаптированности генотипов в условиях глобального потепления климата // *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2022. Т. 183. № 4. С. 39–47. DOI: 10.30901/2227-8834-2022-4-39-47

12. Krivda S.I., Nevkrytaya N.V., Pashtetsky V.S. et al. Analysis of the collection of *Coriandrum sativum* L. as a source of high-potential samples for selection research // International journal of biology and biomedical engineering. 2020. No. 14. Pp. 63–69. DOI: 10.46300/91011.2020.14.10
13. Невкрытая Н. В., Кривда С. И., Бабанина С. С. и др. Анализ коллекции кориандра посевного по селекционно ценным показателям // Таврический вестник аграрной науки. 2021. № 2(26). С. 167–177. DOI: 10.33952/2542-0720-2021-2-26-167-177
14. Збраилова Л. П., Картамышева Е. В., Лучкина Т. Н. и др. Оценка и отбор исходного материала кориандра для создания новых сортов зоны недостаточного увлажнения Ростовской области // Зерновое хозяйство России. 2019. № 5(65). С. 55–61. DOI: 10.31367/2079-8725-2019-65-5-55-61
15. Shams M., Ramezani M., Esfahan S. et al. Effects of climatic factors on the quantity of essential oil and dry matter yield of coriander (*Coriandrum sativum* L.) // Indian Journal of Science and Technology. 2016. No. 9(6). Pp. 1–4. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i6/61301
16. Delibaltova V. Effect of sowing period on seed yield and essential oil composition of coriander (*Coriandrum sativum* L.) in South-East Bulgaria condition. Scientific Papers // Series A. Agronomy. 2020. Vol. LXIII. No. 1. Pp. 233–240. URL: https://agronomyjournal.usamv.ro/pdf/2020/issue_1/Art31.pdf
17. Скиба А. В., Кривда С. И., Кравченко Г. Д. Результаты сравнительного изучения разных сортов кориандра посевного (*Coriandrum Sativum* L.) в предгорной зоне Республики Крым // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. 2020. № 21(184). Pp. 33–46. EDN: XLCOUB
18. Satyal P., Setzer W.N. Chemical compositions of commercial essential oils from *Coriandrum sativum* fruits and aerial parts // Natural Product Communications. 2020. Vol. 15. No. 7. Pp. 1–12. DOI: 10.1177/1934578X20933067
19. Nguyen Q.H., Talou T., Evon P. et al. Fatty acid composition and oil content during coriander fruit development // Food Chemistry. 2020. No. 326. P. 127034. DOI: 10.1016/j.foodchem.2020.127034
20. Кильчевский А. В., Хотылева Л. В. Экологическая селекция растений. Минск: Тэхналогія, 1997. 372 с.

REFERENCES

1. Kačániová M., Galovičová L., Ivanišová E. et al. Antioxidant, antimicrobial and antibiofilm activity of coriander (*Coriandrum sativum* L.) essential oil for its application in foods. *Foods*. 2020. No. 9(3). Pp. 282–301. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods9030282>
2. Karomatov I.D. Coriander as remedy. *Biologiya i integrativnaya meditsina* [Biology and integrative medicine]. 2016. No. 5. Pp. 122–142. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27638595>. EDN: XGVEYV. (In Russian)
3. Tsitsilin A.N., Kovalev N.I., Korotkikh I.N. et al. *Metodika issledovaniy pri introduktsii lekarstvennykh i efirnomaslichnykh rasteniy* [Research methodology during the introduction of medicinal and essential oil plants]. Moscow: FGBNU VILAR, 2022. 64 p. EDN: ELWOOS. (In Russian)
4. Prakhova T.Ya. Ecological aspects of the productivity of nigella varieties in the conditions of the Middle Volga region. *Rossiyskaya sel'skokhozyaystvennaya nauka* [Russian Agricultural Sciences]. 2022. No. 2. Pp. 36–40. DOI: 10.31857/S2500262722020077. (In Russian)
5. Khmelinskaya T.V., Smolenskaya A.E., Solovyeva A.E. Complex biochemical characteristics of *Coriandrum sativum* L. *Trudy po prikladnoy botanike, genetike i selektsii* [Proceedings on applied botany, genetics and breeding]. 2021. Vol. 182. No. 1. Pp. 80–90. DOI: 10.30901/2227-8834-2021-1-80-90. (In Russian)

6. Duwal A., Nepal A., Luitel S. et al. Evaluation of coriander (*Coriandrum sativum* L.) varieties for growth and yield parameters. *Nepalese Journal of Agricultural Sciences*. Vol. 18. Pp. 36–46. URL: <https://www.researchgate.net/publication/337560937>
7. Stepanova N.Yu. Agrobiological assessment of coriander varieties in the Leningrad region. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Izvestiya Saint-Petersburg State Agrarian University]. 2021. No. 4(65). Pp. 20–27. DOI: 10.24412/2078-1318-2021-4-20-27. (In Russian)
8. Nikolaichenko N., Strizhkov N., Azizov Z. et al. The impact of progressive cultivation technology on the productivity of coriander on chernozems of the Lower Volga region. *BIO Web of Conferences*. 2021. No. 37. P. 00141. DOI: 10.1051/bioconf/20213700141
9. Silva M., Soares T., Gheyi H. et al. Hydroponic cultivation of coriander using fresh and brackish waters with different temperatures of the nutrient solution. *Engenharia Agrícola*. 2020. Vol. 40. No. 6. Pp. 674–683. DOI: 10.1590/1809-4430-eng.agric.v40n6p674-683/2020
10. Lukyanov I.A. *Efiromaslichnyye kul'tury* [Essential oil crops. Coriander]. Moscow: Izdatel'stvo sel'skokhozyaystvennoy literatury, 1953. 243 p. (In Russian)
11. Kincharov A.I., Demina E.A., Kincharova M.N. et al. Methodology for assessing the agroecological adaptability of genotypes under global climate warming. *Trudy po prikladnoy botanike, genetike i selektsii* [Proceedings on applied botany, genetics and breeding]. 2022. Vol. 183. No. 4. Pp. 39–47. DOI: 10.30901/2227-8834-2022-4-39-47. (In Russian)
12. Krivda S.I., Nevkrytaya N.V., Pashtetsky V.S. et al. Analysis of the collection of *Coriandrum sativum* L. as a source of high-potential samples for selection research. *International journal of biology and biomedical engineering*. 2020. No. 14. Pp. 63–69. DOI: 10.46300/91011.2020.14.10
13. Nevkrytaya N.V., Krivda S.I., Babanina S.S. et al. Analysis of the collection samples of *coriandrum sativum* L. by valuable breeding indicators. *Tavrisheskiy vestnik agrarnoy nauki* [Taurida herald of the agrarian sciences]. 2021. № 2(26). Pp. 167–177. DOI: 10.33952/2542-0720-2021-2-26-167-177. (In Russian)
14. Zbrailova L.P., Kartamysheva E.V., Luchkina T.N. et al. Estimation and selection of coriander initial material to develop new varieties for the insufficient humidity areas in the rostov region. *Grain Economy of Russia*. 2019. No. 5(65). Pp. 55–61. DOI: 10.31367/2079-8725-2019-65-5-55-61. (In Russian)
15. Shams M., Ramezani M., Esfahan S. et al. Effects of Climatic Factors on the Quantity of Essential Oil and Dry Matter Yield of Coriander (*Coriandrum sativum* L.). *Indian Journal of Science and Technology*. 2016. No. 9(6). Pp. 1–4. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i6/61301
16. Delibaltova V. Effect of sowing period on seed yield and essential oil composition of coriander (*Coriandrum sativum* L.) in South-East Bulgaria condition. *Scientific Papers. Series A. Agronomy*. 2020. Vol. LXIII. No. 1. Pp. 233–240. URL: https://agronomyjournal.usamv.ro/pdf/2020/issue_1/Art31.pdf
17. Skiba A.V., Krivda S.I., Kravchenko G.D. Results of competitive variety testing of *Coriandrum sativum* L. varieties in the foothill zone of the republic of crimea. *Izvestiya sel'skokhozyaystvennoy nauki Tavridy* [News of the agricultural science of Tavrida]. 2020. No. 21(184). Pp. 33–46. EDN: XLCoub. (In Russian)
18. Satyal P., Setzer W.N. Chemical compositions of commercial essential oils from *Coriandrum sativum* fruits and aerial parts. *Natural Product Communications*. 2020. Vol. 15. No. 7. Pp. 1–12. DOI: 10.1177/1934578X20933067
19. Nguyen Q.H., Talou T., Evon P. et al. Fatty acid composition and oil content during coriander fruit development. *Food Chemistry*. 2020. No. 326. P. 127034. DOI: 10.1016/j.foodchem.2020.127034
20. Kilchevskiy A.V., Khotyleva L.V. *Ekologicheskaya selektsiya rasteniy* [Ecological plant breeding]. Minsk: Tekhnologiya, 1997. 372 p.

Финансирование. Исследование проведено без финансовой поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Вклад авторов:

Все авторы принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили представленный вариант.

Contribution of the authors:

All authors were directly involved in the planning, execution, and analysis of this study. All authors of this article have read and approved the submitted version.

Информация об авторах

Шаова Жанна Аскарбиевна, канд. биол. наук, доцент, Майкопский государственный технологический университет;

385000, Россия, г. Майкоп, ул. Первомайская, 191;

zhanna.shaova@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0081-3514>, SPIN-код: 3900-0428

Косарев Владимир Николаевич, канд. биол. наук, доцент, Майкопский государственный технологический университет;

385000, Россия, г. Майкоп, ул. Первомайская, 191;

kosarev77@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0818-8022>, SPIN-код: 3688-9617

Галичева Мария Сергеевна, канд. с.-х. наук, доцент, Майкопский государственный технологический университет;

385000, Россия, г. Майкоп, ул. Первомайская, 191;

mariya-galicheva@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6471-8703>, SPIN-код: 6197-6779

Information about the authors

Zhanna A. Shaova, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Maikop State Technological University;

385000, Russia, Maikop, 191 Pervomayskaya street;

zhanna.shaova@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0081-3514>, SPIN-code: 3900-0428

Vladimir N. Kosarev, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Maikop State Technological University;

385000, Russia, Maikop, 191 Pervomayskaya street;

kosarev77@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0818-8022>, SPIN-code: 3688-9617

Maria S. Galicheva, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Maikop State Technological University;

385000, Russia, Maikop, 191 Pervomayskaya street;

mariya-galicheva@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6471-8703>, SPIN-code: 6197-6779

УДК 658.7

DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-2-150-162

EDN: UPRXFOO

Обзорная статья

Литературный обзор по устойчивому развитию цифровых логистических сетей в сфере сельского хозяйства

А. Н. Меконин, С. Е. Барыкин✉

Высшая школа сервиса и торговли
Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого
195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Новороссийская, 50

Аннотация. Устойчивость цифровых логистических сетей – это сложный вопрос, который включает в себя экономическую эффективность, социальную ответственность и сохранение окружающей среды. В связи с этим растет спрос на решение логистических операций с использованием концепций цифровизации и устойчивого развития. Несмотря на быстрое развитие логистической отрасли, все еще существует пробел в исследованиях, касающихся трансформации логистики в устойчивую цифровую логистику. Таким образом, эта статья направлена на обзор эмпирических и методологических рамок текущего состояния исследований цифровой логистической сети и устойчивости с особым упором, помимо прочего, на сельскохозяйственную логистику. Для обзора и всестороннего анализа широкого круга задач были выбраны авторитетные академические источники. В результате обзора были выявлены некоторые инновационные методы, надежные модели и изучен ряд важных факторов. Оценены достоинства и недостатки источников обзора. Будущие исследования в этой области могут включать эмпирический анализ с широким охватом для анализа логистических операций различных секторов с точки зрения цифровизации и устойчивости.

Ключевые слова: сельское хозяйство, цифровая логистика, логистическая сеть, обзор, устойчивость

Поступила 06.02.2025, одобрена после рецензирования 18.02.2025, принята к публикации 06.03.2025

Для цитирования. Меконин А. Н., Барыкин С. Е. Литературный обзор по устойчивому развитию цифровых логистических сетей в сфере сельского хозяйства // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2025. Т. 27. № 2. С. 150–162. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-2-150-162

JEL: O33

Review article

A literature review on sustainability concept of digital logistics networks in agriculture

A.N. Mekonin, S.E. Barykin✉

Graduate School of Service and Trade
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
195251, Russia, St. Petersburg, 50 Novorossiyskaya street

Abstract. Sustainability in digital logistics networks is a complex issue that encompasses economic efficiency, social responsibility, and environmental preservation. Due to this, there is increasing demand to address logistics operations with the concepts of digitalization and sustainability. Despite the rapid development of the logistics industry, there is still a research gap concerning the transformation of logistics to sustainable digital logistics. Therefore, this article aims at the review of empirical and methodological frameworks of the current state of studies on the digital logistics network and sustainability with particular emphasis on, but not limited to, agricultural logistics. Reputable academic sources were selected for the review and comprehensive analysis of the wide range of tasks. The review result identified some innovative

methods, robust models, and explored certain significant factors. Merits and demerits of the review sources were assessed. Future research in this area could incorporate empirical analysis with a large scope to analyze the logistics operations of different sectors perspectives on digitalization and sustainability.

Keywords: agriculture, digital logistics, logistics network, review, sustainability

Submitted 06.02.2025,

approved after reviewing 18.02.2025,

accepted for publication 06.03.2025

For citation. Mekonin A.N., Barykin S.E. A literature review on sustainability concept of digital logistics networks in agriculture. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2025. Vol. 27. No. 2. Pp. 150–162. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-2-150-162

ВВЕДЕНИЕ / INTRODUCTION

In today's globalized and digitalized economy, logistics development is crucial to cutting costs, boosting transportation options, and improving the efficiency, quality, and safety of transportation and logistics services. While the advancement of digital logistics platforms presents competitive potential, global logistics development is progressing towards greater levels. The digital transformation of logistics platforms has a number of favourable consequences, particularly on logistics activities such as business processes, logistics prices, and logistics service quality [1]. The goal of logistics, which is a system made up of a number of interconnected operations, is to efficiently handle the movement of personnel and materials through the logistics channel. Digital logistics, or logistics 4.0, is the implementation of digital solutions and new technologies in logistics services to improve and optimize supply chain operations for different sectors. Logistics plays a pivotal role in determining the competitiveness of international trade as a major part industry for national economic development. Parts of logistics operations and services that have undergone digital transformations via the use of information and communication technology are known as digital logistics [2].

The digitalization of logistics operations is seen as beneficial by customers, suppliers, and other stakeholders due to the fact that it provides innovative information and communication. Because the industrial supply chain's digitization has become essential for customer orientation, and supply chain and logistics activation, the sharing of substantial amounts of information among supply chain participants will enhance businesses' logistics. When digital logistics is introduced, it means that advanced digital models, techniques, and tools that are based on a shared information and communication platform are available [3]. As digital technology and worldwide communication have emerged in recent decades, logistics and transportation have continued to change. Figure 1 shows how logistics evolves from logistics 1.0 to logistics 4.0.

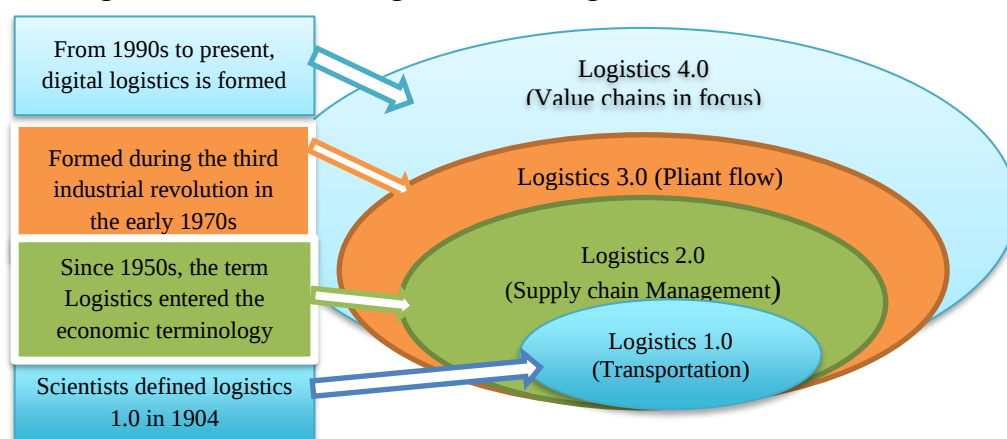


Рис. 1. Эволюционное развитие логистики в разные эпохи

Источник: адаптировано из [3]

Fig. 1. Evolutionary development of logistics in different eras

Source: Adapted from [3]

Despite the fact that several studies have been undertaken on the subject of the logistics, there is still a gap regarding sustainability issues and implementation of digital technology. Therefore, this study is devised to review the methodological and empirical frameworks of a number of studies. The authors of this study have contributed to the existing literature on the sustainability and digitalization of logistics networks by reviewing the current state of studies in the field of logistics.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ / MATERIALS AND METHODS

Academic articles were downloaded from reputable databases and the most relevant 40 articles were selected for the final review work. The reviewed articles were classified into three sections based on the content apparatus and subsequently discussed. Figure 2 represents algorithm of the overall review steps.

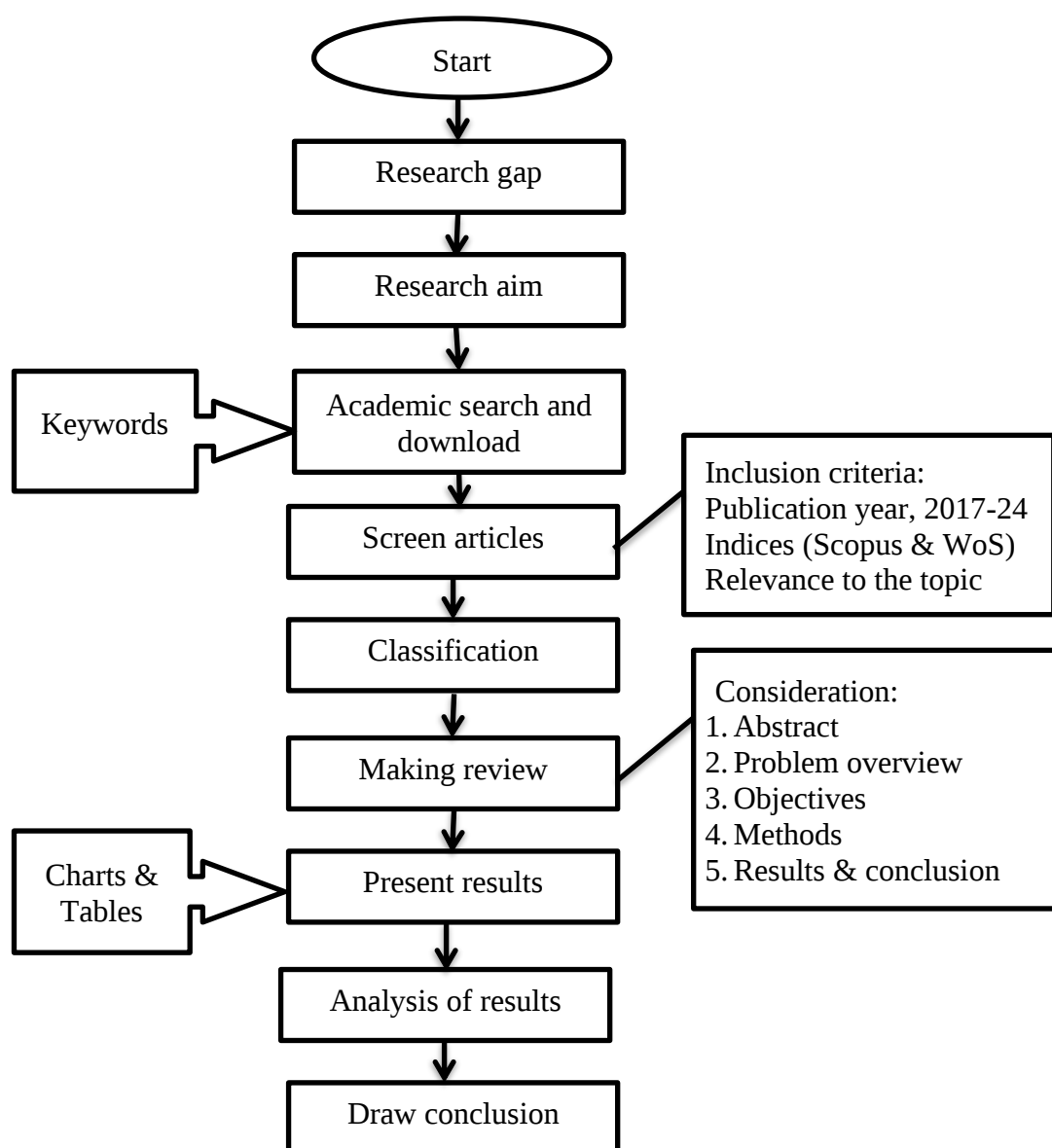


Рис. 2. Алгоритм процедуры рассмотрения

Fig. 2. Algorithm of the review procedure

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ / RESULTS AND DISCUSSION

Descriptive result

The presentation of the results starts with presentation of the data used.

Figure 3 shows that the majority (60%) of the articles included in the review were indexed in both the Web of Science and Scopus databases.

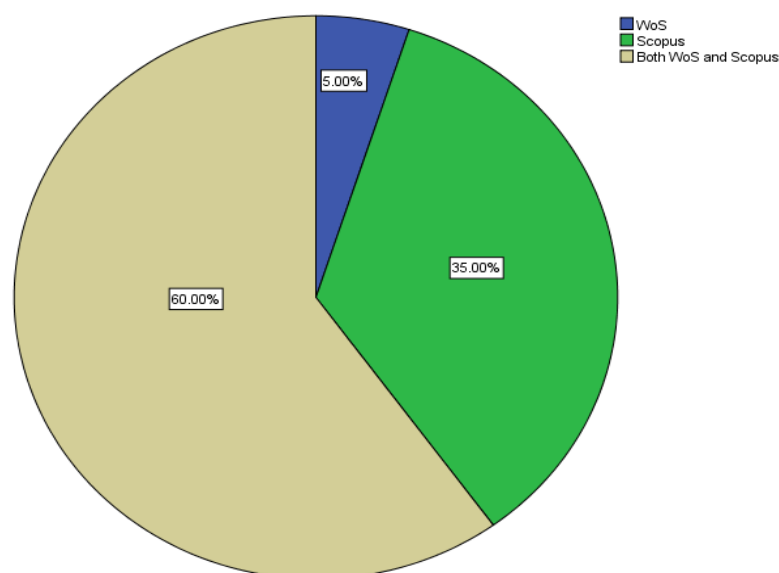


Рис. 3. Статьи по индексу / Fig. 3. Articles by Index

Figure 4 shows 42.5% of the articles that included in the review work were undertaken in China. The publication years, however, span from 2017 to 2024, with 2023 and 2024 accounting for 22.5% and 27.5% of the articles, respectively.

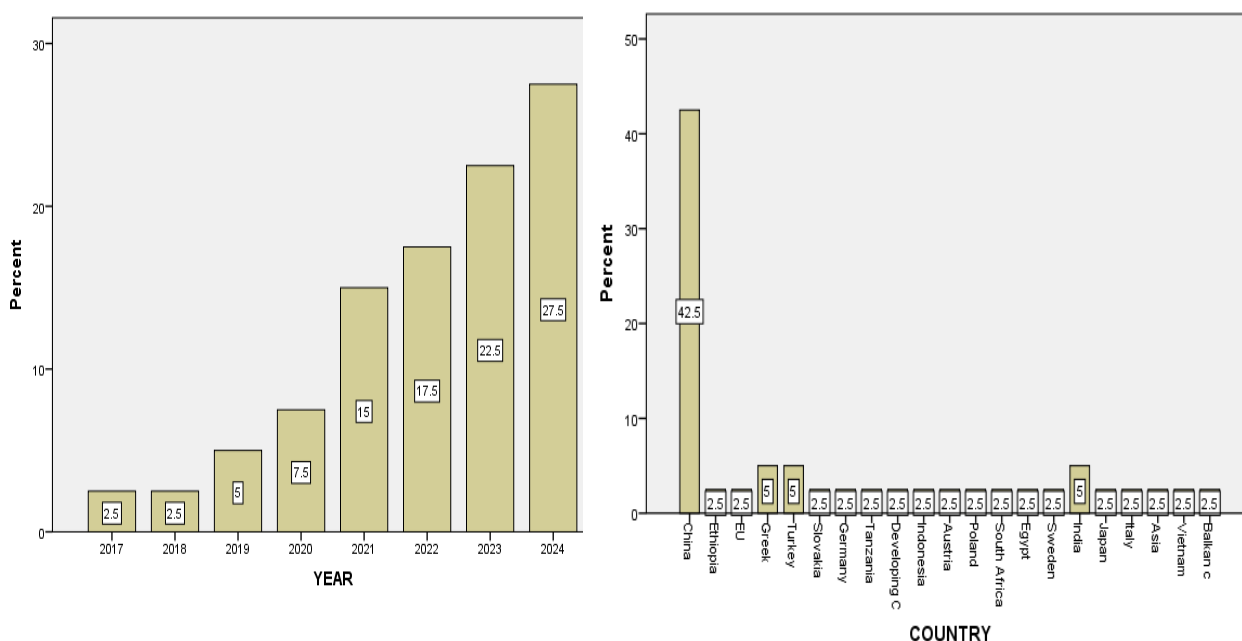


Рис. 4. Статьи по году публикации и стране

Fig. 4. Articles by year of publication and country

Digitalization and Logistics Networks

Digital logistics networks are a concept that comprises the adoption and appropriate implementation of digital technologies within diverse logistics operations to achieve a competitive advantage. The integration of digitalization and logistics networks is applied in a wide range of research areas, and their implications are reviewed. Table 1 presents the comprehensive review results of digitalization and logistics networks. The study conducted on digital technologies for improving logistics performance shows that the effectiveness of logistics and the efficiency of logistics services are predetermined by the integration of digital technologies and use of internet services. Fixed broadband and 4G coverage are key infrastructures that need forward pushing to enhance logistics performance [4]. The impact of digital logistics under the big environment of the economy got special attention from the researcher in China and disclosed that the number of populations, per capita GDP, and population density are highly influencing the logistics process to maximize economic development [5].

Таблица 1. Сводные результаты по цифровизации и логистическим сетям

Table 1. Summary results for digitalization and logistics networks

Author(s)	Methodology	Findings
[4]	Correlation and Regression	The efficiency and efficacy of logistics services are predetermined by the incorporation of digital technology and the utilization of internet services.
[5]	Entropy model and Regression	Population density, per capita GDP, and population size all have a significant impact on the logistics process to optimize economic growth
[6]	Regression analysis	Important determinants of supply chain and sustainable business are transportation, logistics networking, and information sharing.
[7]	Chi-square and Regression	Green logistics technology, logistics warehousing, and logistics packaging are all significantly correlated.
[8]	Qualitative content analysis	Digital B2B platforms directly affect the inclusion and exclusion of actors in the production networks of logistics.
[9]	DES model	Dynamic lot sizing lowers the average amount of semi-finished goods in stock.
[10]	Case study	Lack of resources and the intricacy of the logistics network are the primary challenges faced by logistics service providers.
[11]	Qualitative analysis	Technologies like autonomous cars and route optimization algorithms are revolutionizing last-mile logistics.
[12]	Spatial model	The logistics sector's overall degree of development has a major positive impact on the local economy.
[13]	Exploratory and descriptive	Improving digital leadership, enhancing data usage and security, and implementing customer-centric approaches are some of 3PL's main issues.
[14]	Exploratory Factor Analysis	University students' conceptual comprehension of digital logistics is not influenced by their academic standing

Source: Review result

In connection with the study of implications of green logistics on sustainable business and supply chain performance, information sharing, logistics networking, and transportation are the most significant factors that impact sustainable business and supply chain performance [6]. On the other hand, green logistics technology, certification, and standards are significantly correlated with logistics warehousing and logistics packaging [7]. The impact of digital platforms on labor in the production network of logistics is investigated in Germany and concludes that digital B2B platforms, due to their intermediary function, are found to have a direct impact on the inclusion and exclusion of actors involved in production networks of logistics [8]. A simulation approach study of robust digital production and logistics networks by implementing flexibility measures shows that dynamic lot sizing reduces the average stock of semi-finished goods [9]. However, the main obstacle of the digital transformation at the logistics service providers is the complexity of the logistics network and lack of resources [10]. According to a study on China's Belt and Road Initiative's digital integration of the global supply chain and logistics, route optimization algorithms are revolutionizing last-mile logistics, allowing for quicker and more effective delivery of goods to customers, and drones enhance last-mile delivery technologies like autonomous vehicles [11].

Digital Logistics Network and Sustainability

Sustainable logistics is a comprehensive approach to business operations and ensuring that each step in the product's journey is as green and efficient as possible. In order to meet environmental goals, digitalization for sustainability focuses on the proactive creation and application of digital tools, utilizing technology's capacity to promote favorable outcomes for the environment and its people. Table 2 displays the review result under the concepts of digitalization and sustainability in logistics operations. The study conducted in Turkey suggests that digitalization in logistics has still not reached the maturity level as it is still in the early maturation phase so that sustainability implications can be improved and changed over the years with the maturity level of digitalization [15]. On the other hand, there exists a significant positive mediation of digital enterprise and moderation of sustainability between digital enterprise and China's economic development [16]. Another study conducted on developing a sustainable logistics service quality scale for logistics service providers in Egypt [17] discussed a list of sustainability practices that should be used by logistics service providers in Egyptian culture. Despite having viable goals to meet, Egyptian-owned businesses rarely carry them out in practice, particularly in light of the presence of foreign competitors.

Таблица 2. Сводные результаты по цифровой логистике и устойчивому развитию

Table 2. Summary results for digital logistics and sustainability

Author(s)	Methodology	Findings
[15]	Qualitative analysis	Logistics digitization is still in its infancy, thus as it advances in maturity, its effects on sustainability can be enhanced and modified over time.
[16]	Bootstrapping and algorithms	Significant positive mediation of digital enterprise and moderation of sustainability between digital enterprise and economic development.
[17]	Q-sorting technique	The study explored Sustainability practices. Egyptian companies have sustainable targets to be achieved with low implementation.
[18]	Exploratory with few empirical	Idea generation, Conceptualizing, creating a sustainability business case, and execution comprise the sustainable logistics innovation.
[19]	Partial least square	Customer satisfaction has a favorable impact on re-use intention while information, human contact, and customization qualities have a positive impact on customers' satisfaction.
[20]	Analytical Hierarchy Process	Technological infrastructures, digital solutions, and commitment of the top management affect the adoption of sustainable logistics 4.0.
[21]	Stochastic programming model	Higher collaboration levels successfully cope with demand uncertainty and improve revenues in the entire supply chain.
[22]	Content analysis and modeling	In logistics 4.0, collaborative robots, exoskeletons, and additive manufacturing are the best choices for sustainable development.
[23]	DEA and Tobit model	Logistics investment has a positive correlation with road miles, online retail sales, and firm size.
[24]	Optimization	The study reduced costs by 5.70% by partially optimizing procedures. The updated network subsequently produced overall savings of 10.8%.
[25]	Qualitative & AHP	In landlocked nations, turnaround time has a significant impact on logistical success.

Source: Review result

Idea generation, idea selection, concept development, creating a sustainability business case, execution, and learning comprise the sustainable logistics innovation process. Formalization of the logistics innovation is positively related to the success of sustainable logistics innovation [18]. Customer satisfaction and re-use intention are influenced by the quality of logistics services while operational resources, information, human contact, and customized features favorably affect customer satisfaction [19]. The digital initiatives for sustainability in logistics with the concept of sustainable logistics 4.0 were empirically discussed in India [20]. The results indicate that the main determinants of the adoption of sustainable logistics 4.0 are technological infrastructure, digital solutions, top management commitment, and governmental regulations. The study [21] shows that higher collaboration level successfully copes with demand uncertainty and improves

revenues in the entire supply chain. According to [22], the best technologies, such as additive manufacturing, exoskeletons, and collaborative robots, are the most suitable options for achieving sustainable development goals within Logistics 4.0.

Digital Logistics of Agriculture and Sustainability

Agriculture must include suitable sophisticated technology, digital, and innovations to become more environmentally, economically, and socially sustainable. Making well-informed decisions through digital farming and data-driven agricultural field operations can support agricultural sustainability and resilience. Table 3 presents the review results of digital logistics in agriculture and sustainability. The study conducted in China [26] shows that there is a significant effect of digital economic development on the intensity of agricultural carbon emissions. In the same country, the effect of the digital economy on sustainable agriculture is investigated, and the finding reveals that participation in digital production, digital sales, and digital finance significantly promotes farmers' adoption of ecological agricultural technologies [27].

Таблица 3. Сводные результаты по цифровой логистике и устойчивому развитию в сельском хозяйстве

Table 3. Summary results for agricultural digital logistics and sustainability

Author(s)	Methodology	Result
[26]	Regression analysis	The rise of the digital economy considerably reduces the intensity of carbon emissions from agriculture.
[27]	Treatment effect models	Digital sales and digital finance significantly promote farmers' adoption of ecological agricultural technologies.
[28]	Two-stage least square (2SLS)	Access to credit and extension services, education, and government support are key determinants for agricultural digitalization.
[29]	Content analysis	The integration of digitalization into the agricultural supply chain is severely hampered by rural areas' inconsistent electrical supplies and limited internet connection.
[30]	Supply chain models	Agricultural product vendors prefer to work with 3PL companies when the cost coefficient is low, but they prefer to use their own self-managed logistics when the coefficient rises.
[31]	Path optimization modeling	Effective uses of IoT technology solves problem of lagging agricultural product information, making agriculture product add value in the distribution process.
[32]	Developed sustainable model	The agricultural product logistics industry based on intelligent Blockchain technology could achieved at least 40% of the additional revenue.
[33]	Super efficiency SBM model, spatial models	Both low-carbon logistics efficiency and the level of digital economic development exhibit significant spatial positive correlation.
[34]	DEA and Tobit model	The level of agricultural logistics operation and the level of education of the labor force affect the efficiency of agricultural logistics.
[35]	Co-integration test, ARDL model	Capital, labor and urbanization have long-run positive relationship with both economic growth and carbon emission, respectively.
[36]	Multivariate regression	Logistics enterprise's capacity, demand, human resources, technology adoption have significant impact on agricultural logistics chain.
[37]	What if scenario	The distributed governance strategy for fresh agriculture products shortens processing time and reduces logistics costs.
[38]	Chi-squared test, contingency coefficient	The introduction of digitization and transfer of Big Data in agriculture will lead to better decisions and higher operational efficiency.
[39]	Difference in differences	National Agriculture Market e-trading platform increases the average wholesale prices of selected agri-commodities.
[40]	Spatial Durbin model	Added value of logistics fixed assets, highway mileage, truck number and railway mileage had a positive effect on the growth of agriculture.
[41]	GMM	Carbon emissions per capita and energy consumption from fossil fuels are negatively connected with green logistics.
[42]	Regression analysis	The development of digital economy reduces the carbon emission and promotes the innovation of agricultural green technology.
[43]	Fixed effect model	A significant and positive correlation between carbon dioxide emission and logistics performance was documented.

Source: Review result

On the other side, access to credit, extension services, education, and government support are key determinants for agricultural digitalization in developing countries [28]. Agricultural supply chain resilience is an important topic of discussion when considering the digitalization of the sector. However, limited internet access and unstable electricity supply in rural areas pose major obstacles to integrating digitalization into the agricultural supply chain [29]. The study on optimal logistics service strategies in green agricultural product supply chains with e-commerce platforms argues that agricultural product sellers prefer to cooperate with 3PL enterprises when the cost coefficient is small while they prefer to choose self-managed logistics when the cost coefficient increases [30].

According to the results of path optimization modeling, the problem of lagging agricultural product information can be resolved by using IoT technology effectively [31]. On the other hand, intelligent product logistics integration is effective with the integration of Blockchain technology such that the agricultural product logistics industry based on intelligent Blockchain technology could achieve at least 40% of the additional revenue [32]. Low-carbon logistics efficiency and the level of digital economic development exhibit significant spatial positive correlation [33]. The level of rural goods turnover, the level of agricultural logistics operation, and the level of education of the labour force are the main factors affecting the efficiency of agricultural logistics [34]. Capital, labour, and urbanization have a long-run positive relationship with both economic growth and carbon emissions, respectively, from the perspective of Blockchain technology.

Discussion of Merits and Demerits

Merits: The study provided significant variables with innovative approaches. The challenges of logistics industry are discussed. Integration and development of digital technologies, use of internet access, digital infrastructures, and government policy are among the top contributing factors of digital logistics development and its sustainability. Information sharing, logistics networking, and transportation have an impact on sustainable business and supply chain performance. Logistics enterprises capacity, demand, logistics human resources, technology applications, infrastructure development strategy, service quality, regional linkage in logistics, and priorities in policies have a significant impact on the development of logistics services chains for agricultural products. The complexity of the logistics network and lack of digital infrastructure and resources are identified as the key challenges of the logistics sector. Sustainability implications can be improved and changed over the years with the maturity level of digitization.

The importance and application of advanced technologies for the digitalization and sustainability of logistics operations are clearly indicated in the reviewed articles. For instance, digital B2B platforms have an intermediary function and can decide the inclusion and exclusion of the actors in the production network of sustainable logistics. The introduction of digitalization and Big Data technology in sustainable agricultural logistics will lead to better decisions for higher operational efficiency and promote productivity in the sector. Drones improve last-mile delivery technologies like autonomous vehicles. Additive manufacturing, exoskeletons, and collaborative robots are the most suitable options for achieving suitable development goals within logistics 4.0.

Effective use of IoT technologies solves the problem of lagging agricultural product information and increases the competition and overall benefits of the agricultural market. Intelligent Blockchain technology could achieve at least 40 percent of the additional revenue in

the agricultural product logistics industry. Interesting topics such as green logistics management, logistics network governance, sustainability impact of digitalization in logistics, intelligent logistics, carbon logistics efficiency, optimal logistics service, and robust digital production and logistics networks were studied. Robust model approach studies were conducted on agricultural logistics under the concept of digitalization [26, 28, 31, 33, 34, 41].

Demerits: As drawbacks of the sources used in the current review work, the generalizability problem could be of great concern. Generalization is an act of reasoning that involves drawing broad inferences from particular observations and is widely acknowledged as a quality standard in quantitative research but more controversial in qualitative research. Sources such as [8, 10, 11, 13, 17, 22, 29, 37] employed research methodologies such as what-if scenarios, qualitative analysis, and case studies so that they are more likely to have generalization problems. There are also sources that have a limited scope and small data set for the analysis.

It is easy to generate reliable quantitative results if the data has been properly gathered from the intended source. For example, [25] gathered information by creating a systematic questionnaire to examine important logistical performance metrics in low-income nations. Nevertheless, they used rudimentary descriptive analysis to arrive at a conclusion that was applicable to all low-income nations. Furthermore, [13] used qualitative research techniques to evaluate digital transformation at third-party logistics providers. A quantitative analysis would be highly sound, particularly in light of the company's level of digital preparedness.

The inclusion of biased information in the analysis leads to erroneous conclusions, which affects the reliability of policy decisions. For example, [19] used an online survey to study the impact of digital platforms on labour in production networks. This type of collecting information is highly susceptible to yielding biased information. Additionally, sustainability in digital logistics can be measured in a number of ways. However, some reviewed articles show a deficiency in dealing with the sustainability of digital logistics applied in a wide range of research areas.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ / CONCLUSION

The review result explored that the digitalization in logistics sectors is increasing rapidly due to the integration of advanced digital technologies. The role of advanced technologies such as digital B2B platforms, Big Data technology, drones, additive manufacturing, exoskeletons, collaborative robots, IoT, and Blockchain technologies in the logistics industry is highly important for the sustainability and development of the logistics sector during the digital era. Digital B2B platforms have an intermediary function while Big Data technology leads to better decisions in production networks. Drones improve delivery time while IoT solves the problem of lagging product information. Additive manufacturing, exoskeletons, and collaborative robots are most suitable for the development goals with logistics 4.0. Significant variables contributing to the development of logistics and key challenges existing in the sector are identified and explained. The outcome of the review also identified deficiencies. These include generalization problem, the inclusion of biased information in the analysis, limited scope, and lack of quantitative approach, and the exclusion of sustainability issues in some works. The authors' contribution lies in their conceptual development and critical review of the existing sources. Furthermore, the authors think that the findings of this review may provide a theoretical foundation and pave the way for further research in this area. According to the authors, future studies in digital logistics could cover a wide range of topics, including sustainability concerns and quantitative analysis.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Barykin S., Provotorov I., Sergeev S. et al. Modeling of transport flows of energy resources in digital logistics based on the methodology of multidimensional network structures. *Transport research procedia*. 2022. Vol. 63. Pp. 628–638. DOI: 10.1016/j.trpro.2022.06.056
2. Strandhagen J.O., Vallandingham L.R., Fragapane G. et al. Logistics 4.0 and emerging sustainable business models. *Advances in Manufacturing*. 2017. Vol. 5. Pp. 359–369. DOI: 10.1007/s40436-017-0198-1
3. Mihai N. Digital logistics: Historical background and current key development trends. *Admiral Makarov National University of Shipbuilding*. Pp. 8–26.
4. Moldabekova A., Philipp R., Reimers H. Digital technologies for improving logistics performance of countries. *Transport and telecommunication*. 2021. Vol. 22. No. 2. Pp. 207–266. DOI: 10.2478/ttj-2021-0016
5. Zhang L., Gong L., Tong Y. The impact of digital logistics under the big environment of economy. *PLoS ONE*. 2023. Vol. 22. No. 4. Pp. 1–19. DOI: 10.1371/journal.pone.0283613
6. Trivellas T., Malindretos G., Reklitis P. Implications of green logistics management on sustainable business and supply Chain performance: evidence from a survey in the greek agri-food sector. *Sustainability*. 2020. Vol. 12. Pp. 1–29. DOI: 10.3390/su122410515
7. Yunlin C. Awareness of green logistics technology, certification, and standards by logistics practitioners at Chinese e-commerce company, Jing Dong. *Journal of Shipping and Logistics*. 2023. Vol. 39. Pp. 37–46. DOI: 10.1016/j.ajsl.2023.10.004
8. Helwind V., Verfürth P., Franz M. Trucking (un) limited – the impact of digital platforms on labor in production networks of logistics. *Advances in Economic Geography*. 2023. Vol. 67. No. 4. Pp. 177–188. DOI: 10.1515/zfw-2021-0032
9. Birkmaier A., Oberegger B., Felsberger A. et al. Towards a robust digital production and logistics network by implementing flexibility measures. *Procedia CIRP*. 2021. Vol. 104. Pp. 1310–1315. DOI: 10.1016/j.procir.2021.11.220
10. Cichosz M., Wallenburg C.M., Knemeyer A.M. Digital transformation at logistics service providers : barriers, success factors and leading practices. *International Journal of Logistics and Management*. 2020. Vol. 31. No. 2. Pp. 209–238. DOI: 10.1108/IJLM-08-2019-0229
11. Wang M., Childerhouse P., Abareshi A. Global logistics and supply chain integration in the digital era : a focus on China’s Belt and Road Initiative. *Journal of international logistics and trade*. 2024. Vol. 22. No. 2. Pp. 58–79. DOI: 10.1108/JILT-03-2023-0018
12. Li X., Chen F. Impact of logistics development on economic growth : an empirical research from Guangdong Province in China. *Complexity*. 2021. Pp. 1–12. DOI: 10.1155/2021/9950935
13. Mvubu M., Naude M.J. Digital transformation at third-party logistics providers : Challenges and best practices. *Journal of transport and supply chain management*. 2024. Vol. 18. Pp. 1–16. DOI: 10.4102/jtscm.v18i0.1023
14. Emre A., Somuncu S., Korkmaz M., Demirci E. Conceptual awareness levels of digital logistics among Turkish university students. *Humanities & social sciences communications*. 2024. DOI: 10.1057/s41599-024-02907-8
15. Kayikci Y. Sustainability impact of digitization in logistics. *Procedia*. 2018. Vol. 21. Pp. 782–789. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.02.184
16. Pei J. Approaches toward building the digital enterprise and sustainable economic developmen. *Frontier in Psychology*. 2022. Vol. 13. Pp. 1–11. DOI: 10.3389/fpsyg.2022.835602

17. Ali A.H., Melkonyan A., Noche B., Gruchmann T. Developing a sustainable logistics service quality scale for logistics service providers in Egypt. *Logistics*. 2021. Vol. 5. No. 21. Pp. 1–16. DOI: 10.3390/logistics5020021
18. Björklund, M., Forslund, H. Exploring the sustainable logistics innovation process, *Industrial management & data systems*. 2018. Vol. 118. No. 1. Pp. 204–217. DOI: 10.1108/IMDS-02-2017-0058
19. Lin X., Mamun A.A., Yang Q., Masukujjaman M. Examining the effect of logistics service quality on customer satisfaction and re-use. *PLoS ONE*. 2023. Vol. 18. No. 5. Pp. 1–24. DOI: 10.1371/journal.pone.0286382
20. Parhi S., Joshi K., Gunasekaran A., Sethuraman K. Reflecting on an empirical study of the digitalization initiatives for sustainability on logistics: The concept of sustainable logistics 4.0. *Cleanerlogistics and supply chain*. 2022. Vol. 4. Pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.clscn.2022.100058
21. Ito A., Kaihara T., Kokuryo D., Fujii N. A study on collaborative logistics network design with truck Sharing under demand uncertainty. *IFAC online*. 2023. Vol. 56. No. 2. Pp. 5227–5232. DOI: 10.1016/j.ifacol.2023.10.120
22. Ferraro S., Cantini A., Leoni L., De Carlo F. Sustainable logistics 4.0: a study on selecting the best technology for internal material handling. *Sustainability*. 2023. Vol. 15. Pp. 1–22. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15097067>
23. Tong J., Wu X., Yin Y. Logistics efficiency evaluation and empirical research under the new retailing model: the way toward sustainable development. *Sustainability*. 2023. Vol. 15. P. 15028. DOI: 10.3390/su152015028
24. Karagiannis G., Minis I., Arampantzi C., Dikas G. Warehousing and distribution network design from a third-party logistics (3PL) company perspective. *International journal of production research*. 2024. Vol. 62. Pp. 260–270. DOI: 10.1080/00207543.2023.2248280
25. Tadesse M.D., Kine H.Z., Gebresenbet G. et al. Key logistics performance indicators in low-income countries: the case of the import – export Chain in Ethiopia. *Sustainability*. 2022. Vol. 14. 12204. Pp. 1–25. DOI: 10.3390/su141912204
26. Tong L., Wang C., Qi Q. et al. Study on the impact of China's digital economy on agricultural carbon emissions. *Global NEST journal*. 2024. Vol. 26. No. 6. 06183. Pp. 1–13. DOI: 10.30955/gnj.006183
27. Chunfang Y., Xing J., Changming C. et al. Digital economy empowers sustainable agriculture: Implications for farmers' adoption of ecological agricultural technologies. *Ecological indicators*. 2024. Vol. 159. 111723. Pp. 1–15. DOI: 10.1016/j.ecolind.2024.111723
28. Kitole F.A., Mkuna E., Sesabo J.K. Technology digitalization and agricultural transformation in developing countries: empirical evidence from Tanzania agriculture sector. *Smart Agricultural Technology*. 2024. Vol. 7. 100379. Pp. 1–7. DOI: 10.1016/j.atech.2023.100379
29. Keefe D.M.S., Jang H., Sur J. Digitalization for agricultural supply chains resilience: perspectives from Indonesia as an ASEAN member. *Asian journal of Shipping and Logistics*. 2024. Vol. 40. Pp. 180–186. DOI: 10.1016/j.ajsl.2024.09.001
30. Zhou C., Bai D., Liu Z. et al. Optimal logistics service strategies in green agricultural product supply chains with E-commerce platforms. *Sustainable Operations and Computers*. 2024. Vol. 5. Pp. 156–166. DOI: 10.1016/j.susoc.2024.06.002
31. Ai X., Zhang Y. Modeling analysis of intelligent logistics distribution path of agricultural products under internet of things environment. *Springer International Publishing*. 2019. Vol. 279. Pp. 322–329. DOI: 10.1007/978-3-030-19086-6

32. Zheng F., Zhou X. Sustainable model of agricultural product logistics integration based on intelligent blockchain technology. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2023. Vol. 57. 103258. Pp. 1–8. DOI: 10.1016/j.seta.2023.103258
33. Zhang J., Liu H., Wang J., Huang Q. Spatial impact of the digital economy on low-carbon logistics efficiency in RCEP countries. *Journal of Environmental Management*. 2024. Vol. 360. 121221. Pp. 1–8. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.121221
34. Automatisés S., Hao H., Yin S. et al. Research on agricultural logistics efficiency based on DEA and tobit regression models. 2022. Vol. 55. Pp. 71–79. DOI: 10.18280/jesa.550107
35. Gu Z., Malik H.A., Chupradit S. et al. Green supply chain management with sustainable economic growth by CS-ARDL technique: perspective to blockchain technology. *Frontier in Public Health*. 2022. Vol. 9. Pp. 1–13. DOI: 10.3389/fpubh.2021.818614
36. Loi N.T., Hoa H.T.T., Danh N.T. Affecting the development of a logistics service chain for agricultural products in the Mekong Delta, Vietnam. *Transportation Research Procedia*. 2024. Vol. 80. Pp. 127–136. DOI: 10.1016/j.trpro.2024.09.017
37. Perdana T., Tjahjono B., Kusnandar K. et al. Fresh agricultural product logistics network governance: insights from small-holder farms in a developing country. *International Journal of Logistics Research and Applications*. 2023. Vol. 26. Pp. 1761–1784. DOI: 10.1080/13675567.2022.2107625
38. Dupal' A., Richnák P., Szabo L., Porubánová K. Modern trends in logistics of agricultural enterprises. *Agricultural Economics*. 2019. Vol. 65. No. 8. Pp. 359–365. DOI: 10.17221/367/2018
39. Chaudhary S., Suri P.K. The impact of digitalisation on the agricultural wholesale prices to aid agrarian income. *Agricultural Economics*. 2022. Vol. 68. Pp. 361–370. DOI: 10.17221/113/2022
40. Li X., Jiang J., Cifuentes-faura J. The impact of logistic environment and spatial spillover on agricultural economic growth: An empirical study based on East, Central and West China. *PLoS ONE*. 2023. Vol. 18. No. 7. Pp. 1–19. DOI: 10.1371/journal.pone.0287307
41. Li B., Gao Y. Impact and transmission mechanism of digital economy on agricultural energy carbon emission reduction. *International Review of Economic and Finance*. 2024. Vol. 95. 103457. Pp. 1–15. DOI: 10.1016/j.iref.2024.103457
42. Karaduman H.A., Karaman-akgöl A., Caglar M., Akba H.E. The relationship between logistics performance and carbon emissions: an empirical investigation on Balkan countries. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*. 2020. Vol. 12. No. 4. Pp. 449–461. DOI: 10.1108/IJCCSM-05-2020-0041

Финансирование. Исследование проведено без финансовой поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Вклад авторов:

С. Е. Барыкин – методическое руководство работой над статьей;
А. Н. Меконин – сбор и анализ материала для статьи.

Contribution of the authors:

S.E. Barykin – methodological guidance for the work on the article;
A.N. Mekonin – collection and analysis of material for the article.

Информация об авторах

Меконин Абера Негери, аспирант, Высшая школа сервиса и торговли, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого;

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Новороссийская, 50;

tgmoke@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2879-7459>

Барыкин Сергей Евгеньевич, д-р экон. наук, профессор, заместитель директора по научным исследованиям и разработкам, Высшая школа сервиса и торговли, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого;

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Новороссийская, 50;

sbe@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9048-009X>, SPIN-код: 9382-2074

Information about the authors

Abera N. Mekonin, Post-graduate Student, Graduate School of Service and Trade, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University;

195251, Russia, St. Petersburg, 50 Novorossiyskaya street;

tgmoke@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2879-7459>

Sergey E. Barykin, Doctor of Economic Sciences, Professor, Deputy Director for Scientific Research and Development, Graduate School of Service and Trade, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University;

195251, Russia, St. Petersburg, 50 Novorossiyskaya street;

sbe@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9048-009X>, SPIN-code: 9382-2074

УДК 338.43

Аналитическая статья

DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-2-163-172

EDN: VGEFXX

Пространственная организация сельского хозяйства как основа рационального размещения и специализации

Л. П. Силаева

Федеральный научный центр аграрной экономики и социального развития сельских территорий –
Всероссийский научно-исследовательский институт экономики сельского хозяйства
123007, Россия, Москва, Хорошевское шоссе, 35, корп. 2

Аннотация. Санкции, введенные против России европейскими странами и Соединенными Штатами Америки, внесли коррективы в процесс импортозамещения и пространственного развития сельского хозяйства. В сложившейся ситуации под воздействием как внутренних, так и внешних факторов, проблема с рациональным размещением производства сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия осложнилась. Необходимыми условиями обеспечения населения продовольствием являются рациональное использование биоклиматического потенциала, соответствующего эффективному производству продукции сельского хозяйства, создание специализированных зон в ареалах и регионах с наиболее благоприятными природными условиями. *Цель исследования* – разработка предложений по пространственному развитию отраслей сельского хозяйства России и созданию специализированных зон по производству сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия. *Методы исследования* опираются на использование программно-целевого метода, предусматривающего формирование приоритетных направлений по пространственному развитию сельского хозяйства. Наличие больших различий в организации производства и особенно его подотраслей делает невозможным формирование подходов к их пространственной организации. Особого внимания требуют регионы с благоприятными природно-экономическими условиями и с небольшой численностью населения, где необходимо ведение интенсивного сельского хозяйства с высоким показателем конкурентоспособности, территории, относящиеся к приоритетным и геостратегическим, а также слабозаселенные. К ним относятся Нечерноземная зона, районы Крайнего Севера, республики Северного Кавказа. При этом с усилением дифференциации регионов по уровню производства отдельных видов продукции сельского хозяйства важную роль должно играть государство. В России особенностью пространственной организации развития сельского хозяйства является большое разнообразие территориальных, природно-климатических, социальных и экономических различий. Поэтому региональный аспект ведения не только отрасли, но и всех ее подотраслей, имеет одно из важных значений. Пространственное развитие в силу сложившихся современных условий связано с изменением производственной направленности предприятий, административных районов и регионов, нуждающихся в поступлении инвестиций и требующих определенного времени для осуществления данного процесса.

Ключевые слова: пространственное развитие, сельскохозяйственная специализация, концентрация, размещение, сельское хозяйство, регион, зоны

Поступила 03.03.2025, одобрена после рецензирования 15.03.2025, принята к публикации 04.04.2025

Для цитирования. Силаева Л. П. Пространственная организация сельского хозяйства как основа рационального размещения и специализации // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2025. Т. 27. № 2. С. 163–172. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-2-163-172

Spatial organization of agriculture as a basis for rational placement and specialization

L.P. Silaeva

Federal Scientific Center for Agrarian Economics and Social Development of Rural Areas –
All-Russian Research Institute of Agricultural Economics
123007, Russia, Moscow, 35 Khoroshevskoe highway, 2 building

Abstract. The sanctions imposed on Russia by European countries and the United States of America have made adjustments to the process of import substitution and spatial development of agriculture. In the current situation, under the influence of both internal and external factors, the problem of rational placement of production of agricultural products, raw materials and food has become more complicated. A necessary condition for providing the population with food is the rational use of bioclimatic potential corresponding to the efficient production of agricultural products, the creation of specialized zones in areas and regions with the most favorable natural conditions. The purpose of the study is to develop proposals for the spatial development of Russian agricultural industries and the creation of specialized zones for the production of agricultural products, raw materials and foodstuffs. The research methods are based on the use of a program-oriented method, which provides for the formation of priority areas for the spatial development of agriculture. The presence of large differences in the organization of production and especially its sub-sectors makes it impossible to form approaches to their spatial organization. Regions with favorable natural and economic conditions and a small population, where intensive agriculture with a high competitiveness index is necessary, territories that are considered priority and geostrategic, as well as sparsely populated areas, require special attention. These include the Non-Black Earth Zone, the regions of the Far North, and the republics of the North Caucasus. At the same time, with the increasing differentiation of regions by the level of production of individual types of agricultural products, the state should play an important role. In Russia, the peculiarity of the spatial organization of agricultural development is a great diversity of territorial, natural-climatic, social and economic differences. Therefore, the regional aspect of management of not only the industry, but also all its sub-industries, is one of the important values. Spatial development, due to the current modern conditions, is associated with a change in the production focus of enterprises, administrative districts and regions that require investment and require a certain amount of time to carry out this process.

Keywords: spatial development, agricultural specialization, concentration, placement, agriculture, region, zones

Submitted 03.03.2025,

approved after reviewing 15.03.2025,

accepted for publication 04.04.2025

For citation. Silaeva L.P. Spatial organization of agriculture as a basis for rational placement and specialization. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2025. Vol. 27. No. 2. Pp. 163–172. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-2-163-172

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы развитие сельскохозяйственного производства характеризуется положительной динамикой, позволившей достичь основных параметров Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации в части самообеспечения сельскохозяйственной и продовольственной продукцией по таким видам, как зерно, растительное масло, сахар, мясо и мясопродукты, рыба и рыбопродукты, картофель. Указом Президента Российской Федерации от 7 мая 2024 г. № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года» установлены основные параметры дальнейшего развития отрасли, связанного с увеличением объема производства

продукции агропромышленного комплекса не менее чем на 25 % и ее экспорта не менее чем в 1,5 раза по сравнению с 2021 годом [1].

Согласно Стратегии пространственного развития Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2036 года, утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации от 28.12.2024 г. № 4146-р, «основная задача развития социальной сферы села – это сокращение дифференциации в социально-экономическом развитии территорий за счет роста обеспеченности инфраструктурой опорных населенных пунктов в сельской местности. Ее решение возможно за счет комплексного пространственного развития, обеспечения дифференцированного подхода к направлениям и мерам государственной поддержки функционирования опорных населенных пунктов, учитывающего их особенности и динамику развития, специфику природных условий и роль указанных территорий в достижении приоритетов развития» [2]. В этой связи разработка научно обоснованных предложений по приоритетным направлениям развития сельского хозяйства и социального развития сельских территорий, обеспечивающих эффективное пространственное развитие сельского хозяйства и смежных с ним отраслей в рамках реализуемых государственных программ и проектов, приобретает особую актуальность.

Цель исследования – разработка предложений по пространственному развитию отраслей сельского хозяйства России и созданию специализированных зон по производству сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия.

Методы исследования опираются на использование программно-целевого метода, предусматривающего формирование приоритетных направлений по пространственному развитию сельского хозяйства.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Территориальное разделение труда представляет собой «...пространственное отражение общественного разделения труда, обусловленное природными, экономическими, социальными и национально-историческими особенностями отдельных регионов страны. Оно характеризует географию размещения производства, которое сложилось под одновременным воздействием развития производительных сил, природных и экономических условий» [3]. Во-первых, оно разграничивает регионы по производственному показателю основных видов продукции; во-вторых, способствует их объединению и как следствие усиливает обмен продукцией между регионами. В результате территориальное разделение труда формирует специализацию региона с концентрацией производства сельскохозяйственной продукции, объемы которой превышают потребности. Поэтому территориально-отраслевое разделение труда закрепляет сельскохозяйственные подотрасли и их производство в них за конкретными территориями и дает возможность повысить показатели эффективности экономики в регионах.

В условиях современной экономики каждый отдельно взятый регион обеспечивает единый процесс воспроизводства в стране. Углубление специализации и расширение межрегиональных связей способствует формированию единого рынка, в основе которого «...лежит региональное разделение труда. В то же время изолированность региона для того, чтобы собственное производство не конкурировало с другими регионами, приводит к сокращению обмена между регионами, не способствует использованию преимуществ территориально-отраслевого разделения труда с целью решения их экономических проблем» [4].

В основе территориально-отраслевого разделения труда лежит процесс специализации и концентрации производства, то есть специализация влияет на уровень концентрации, которая ведет к углублению его специализации. Одним из условий специализации и концентрации подотраслей растениеводства являются благоприятные почвенно-климатические

условия: природные ресурсы при определенном тепловом режиме, влажность, уровень почвенного плодородия. Поэтому природные и экономические условия зон производства определяют ареалы возделывания многих сельскохозяйственных культур [5].

Россия имеет почти 560 климатических и географических зон, обладающих большим потенциалом производства продукции сельского хозяйства. Поэтому рациональное размещение должно играть особую роль в повышении как эффективности развития агропромышленного комплекса, так и конкурентоспособности сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия.

Регионы, расположенные на территории Северного Кавказа, имеют особое геостратегическое положение. Во-первых, они обладают исключительным расположением, заключающимся в пересечении международных транспортных коридоров, во-вторых, располагают морской, железнодорожной и автомобильной транспортной инфраструктурой. Кроме того, регионы, формирующие Северо-Кавказский федеральный округ, обладают природными и климатическими условиями, благоприятными для производства сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия. Например, предгорные территории Северного Кавказа имеют высокопродуктивные естественные кормовые угодья для развития животноводства. В то же время не все территории располагают такими почвами, а отдельные районы относятся к слабо развитым субъектам федерации с низким уровнем социальных и экономических показателей [5].

При высоком потенциале развития аграрного сектора в Северо-Кавказском федеральном округе, выгодном экономическом и географическом расположении можно отметить слабое развитие кооперации, недостающую интеграцию сельскохозяйственных товаропроизводителей. Роль сельского хозяйства региона заключается не только в развитии экономики, оно выполняет функцию, обеспечивающую занятость сельского населения на данной территории. Поэтому перспективным направлением должно стать развитие сельской кооперации в регионах с благоприятными природными условиями с целью организации конкурентоспособного сельского хозяйства и отраслей пищевой и перерабатывающей промышленности. Это будет способствовать обеспечению продовольственной безопасности, формированию ресурсов сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия для межрегионального обмена.

В настоящее время Северо-Кавказский федеральный округ формируют шесть республик и Ставропольский край, которые расположены в основном в степной зоне. Местное население составляет 6,7 % от общей его численности по стране. На долю округа приходится 5,5 % площадей, занятых сельскохозяйственными культурами, и более 8 % валовой сельскохозяйственной продукции. По отдельным видам ее доля превышает удельный вес в численности населения страны (табл. 1).

Объем валовой продукции Северо-Кавказского федерального округа составляет 513 млрд рублей. На территории округа в структуре размещения сельскохозяйственной продукции производится почти 28 % овощей, более 28 % подсолнечника и 15 % говядины. Второе место после Южного федерального округа по производству баранины занимает Северо-Кавказский федеральный округ.

Основным производителем зерна на Северном Кавказе является Ставропольский край – 70,4 %. Более 89 % приходится на сахарную свеклу и 79 % – на маслосемена. Здесь производится 85,6 % свинины и 70,6 % мяса птицы. В то же время Ставропольский край, Республика Дагестан и Кабардино-Балкарская Республика производят свыше 73 % объема картофеля и более 50 % яиц. Лидирует по производству овощей Дагестан, где получают 57,2 % овощной продукции. На его долю приходится более 41 % говядины и почти 50 % баранины [6].

Высокий потенциал производства сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия, благоприятное экономическое и выгодное географическое положение регионов Северного Кавказа позволяют в перспективе обеспечить стабильность развития сельского хозяйства, пищевой и перерабатывающей промышленности, продукция которых займет достойное место на внутреннем и внешнем агропродовольственных рынках [7].

Таблица 1. Объем и структура производства основных видов сельскохозяйственной продукции в Северо-Кавказском федеральном округе в 2019–2023 гг.

Table 1. Volume and structure of production of the main types of agricultural products in the North Caucasus Federal District in 2019–2023.

Продукция	Северо-Кавказский федеральный округ	Республика Дагестан	Республика Ингушетия	Кабардино-Балкарская Республика	Карачаево-Черкесская Республика	Республика Северная Осетия-Алания	Чеченская Республика	Ставропольский край
Зерно	<u>11890,7</u> 100,0	<u>441,7</u> 3,7	<u>110,8</u> 0,9	<u>1256,9</u> 10,6	<u>445,9</u> 3,7	<u>828,0</u> 7,0	<u>435,0</u> 3,7	<u>8372,6</u> 70,4
Сахарная свекла	<u>1859,3</u> 100,0	–	–	–	<u>189,8</u> 10,2	–	<u>12,9</u> 0,7	<u>1656,5</u> 89,1
Маслосемена	<u>944,1</u> 100,0	<u>7,3</u> 0,8	<u>1,8</u> 0,2	<u>62,0</u> 6,6	<u>23,7</u> 2,5	<u>33,9</u> 3,6	<u>68,2</u> 7,2	<u>747,2</u> 79,1
в том числе подсолнечник	<u>589,8</u> 100,0	<u>6,9</u> 1,2	<u>1,0</u> 0,2	<u>38,0</u> 6,4	<u>22,9</u> 3,9	<u>2,6</u> 0,4	<u>19,9</u> 3,4	<u>498,6</u> 84,5
Картофель	<u>1014,8</u> 100,0	<u>344,8</u> 34,0	<u>47,4</u> 4,7	<u>164,7</u> 16,2	<u>112,2</u> 11,1	<u>70,2</u> 6,9	<u>40,4</u> 4,0	<u>235,3</u> 23,2
Овощи	<u>2209,6</u> 100,0	<u>1263,9</u> 57,2	<u>8,1</u> 0,4	<u>392,3</u> 17,8	<u>69,9</u> 3,2	<u>27,8</u> 1,3	<u>102,3</u> 4,6	<u>345,2</u> 15,6
Мясо всех видов	<u>719,9</u> 100,0	<u>151,9</u> 21,1	<u>6,0</u> 0,8	<u>79,5</u> 11,0	<u>32,6</u> 4,5	<u>28,0</u> 3,9	<u>24,6</u> 3,4	<u>397,3</u> 55,2
в т.ч.: говядина	<u>157,1</u> 100,0	<u>64,9</u> 41,3	<u>2,9</u> 1,8	<u>26,0</u> 16,5	<u>12,0</u> 7,6	<u>8,5</u> 5,4	<u>19,5</u> 12,4	<u>23,4</u> 14,9
свинина	<u>64,9</u> 100,0	<u>0,2</u> 0,3	–	<u>1,9</u> 2,9	<u>0,4</u> 0,6	<u>6,9</u> 10,7	–	<u>55,5</u> 85,6
баранина	<u>67,1</u> 100,0	<u>33,4</u> 49,7	<u>1,1</u> 1,7	<u>4,1</u> 6,2	<u>8,6</u> 12,8	<u>2,6</u> 3,9	<u>2,4</u> 3,5	<u>14,9</u> 22,1
мясо птицы	<u>429,0</u> 100,0	<u>53,1</u> 12,4	<u>1,9</u> 0,4	<u>47,2</u> 11,0	<u>11,4</u> 2,7	<u>9,9</u> 2,3	<u>2,6</u> 0,6	<u>303,0</u> 70,6
Молоко	<u>2842,1</u> 100,0	<u>934,2</u> 32,9	<u>126,4</u> 4,4	<u>558,3</u> 19,6	<u>200,6</u> 7,1	<u>202,3</u> 7,1	<u>297,2</u> 10,5	<u>523,3</u> 18,4
Яйца, млн шт.	<u>1587,3</u> 100,0	<u>245,0</u> 15,4	<u>24,0</u> 1,5	<u>237,4</u> 15,0	<u>81,9</u> 5,2	<u>68,8</u> 4,3	<u>124,1</u> 7,8	<u>806,1</u> 50,8

*) В числителе – объем производства, тыс. т, в знаменателе – удельный вес производства в федеральном округе, %.

Источник: составлена и рассчитана по данным Росстата [8].

Дальнейшее развитие должны получить и регионы Поволжья, где традиционно выращивается высококачественная продовольственная пшеница (21 %), семена масличных культур (26,1 %), картофель (25,3 %), производятся все виды мяса (21,0 %), молоко (31,0 %) и яйца (25,7). Несколько ниже показатели по производству сахарной свеклы, овощей, мяса свиней и баранины.

Приволжский федеральный округ включает четырнадцать регионов, расположенных в лесостепной и южнотаежной лесной зонах. Здесь на площади 24,0 млн га выращивают 23,0 % всей сельскохозяйственной валовой продукции. Это второй после Центрального федерального округа по численности населения регион.

Зерно является основным видом сельскохозяйственной продукции, выращиваемой в Поволжье. На долю Саратовской и Оренбургской областей, республик Татарстан и Башкортостан приходится более 54,4 % валового сбора зерновых культур, 2/3 сахарной свеклы выращивается в Пензенской области, республиках Татарстан и Башкортостан [3].

Лидерами по выращиванию семян масличных культур являются Саратовская, Самарская и Оренбургская области. Около половины картофеля в Приволжском федеральном округе получают в Нижегородской области, республиках Татарстан и Башкортостан. Продукцию животноводства производят в основном в республиках Башкортостан, Мордовия и Марий Эл, а также в Пензенской области. Более 42 % говядины, 46,6 % баранины и 36 % молока производят в Башкортостане и Татарстане. Также в Поволжье производят 2663 тыс. т овощей, 4471,2 тыс. т подсолнечника и 11283,6 млн шт. яиц (табл. 2).

Таблица 2. Объем и структура производства основных видов сельскохозяйственной продукции в Приволжском федеральном округе в 2019–2023 гг.

Table 2. Volume and structure of production of the main types of agricultural products in the Volga Federal District in 2019–2023

Продукция	Приволжский федеральный округ	Республика Башкортостан	Республика Марий Эл	Республика Мордовия	Республика Татарстан	Оренбургская область	Пензенская область	Саратовская область
Зерно	<u>28444,9</u> 100,0	<u>3471,5</u> 12,2	<u>297,7</u> 1,0	<u>1518,3</u> 5,3	<u>4107,8</u> 14,4	<u>2939,1</u> 10,3	<u>2772,8</u> 9,7	<u>4980,7</u> 17,5
Сахарная свекла	<u>7891,5</u> 100,0	<u>1438,7</u> 18,2	–	<u>881,5</u> 11,2	<u>1995,3</u> 25,3	<u>28,4</u> 0,4	<u>2344,6</u> 29,7	<u>429,5</u> 5,4
Маслосемена	<u>6666,0</u> 100,0	<u>470,9</u> 7,1	<u>8,4</u> 0,1	<u>108,1</u> 1,6	<u>408,9</u> 6,1	<u>1253,5</u> 18,8	<u>658,0</u> 9,9	<u>2149,8</u> 32,3
в том числе подсолнечник	<u>5684,5</u> 100,0	<u>372,4</u> 6,6	–	<u>11,6</u> 0,2	<u>227,9</u> 4,0	<u>1198,3</u> 21,1	<u>522,7</u> 9,2	<u>1979,0</u> 34,8
Картофель	<u>4980,4</u> 100,0	<u>630,3</u> 12,7	<u>244,7</u> 4,9	<u>269,0</u> 5,1	<u>991,5</u> 19,9	<u>137,2</u> 2,8	<u>329,5</u> 6,6	<u>135,1</u> 2,7
Овощи	<u>2509,7</u> 100,0	<u>280,1</u> 11,2	<u>124,4</u> 5,0	<u>97,1</u> 3,9	<u>294,5</u> 11,7	<u>177,7</u> 7,1	<u>118,8</u> 4,7	<u>360,5</u> 14,4
Мясо всех видов	<u>2400,9</u> 100,0	<u>279,6</u> 11,6	<u>280,7</u> 11,7	<u>291,8</u> 12,2	<u>355,9</u> 14,8	<u>134,0</u> 5,6	<u>328,5</u> 13,7	<u>112,7</u> 4,7
в т.ч.: говядина	<u>459,0</u> 100,0	<u>97,9</u> 21,3	<u>8,5</u> 1,8	<u>13,6</u> 3,0	<u>95,1</u> 20,7	<u>43,8</u> 9,5	<u>16,0</u> 3,5	<u>38,2</u> 8,3
свинина	<u>713,2</u> 100,0	<u>86,7</u> 12,2	<u>64,5</u> 9,1	<u>104,4</u> 14,6	<u>82,1</u> 11,5	<u>37,9</u> 5,3	<u>59,4</u> 8,3	<u>50,0</u> 7,0
баранина	<u>34,2</u> 100,0	<u>6,8</u> 19,8	<u>0,6</u> 1,6	<u>0,1</u> 0,3	<u>9,2</u> 26,8	<u>3,5</u> 10,4	<u>0,9</u> 2,6	<u>6,4</u> 18,6
мясо птицы	<u>1179,2</u> 100,0	<u>82,1</u> 7,0	<u>207,0</u> 17,6	<u>173,6</u> 14,7	<u>167,1</u> 14,2	<u>46,4</u> 3,9	<u>251,6</u> 21,3	<u>17,8</u> 1,5
Молоко	<u>10075,3</u> 100,0	<u>1621,7</u> 16,1	<u>198,2</u> 2,0	<u>488,3</u> 4,8	<u>2006,3</u> 19,9	<u>622,3</u> 6,2	<u>365,9</u> 3,6	<u>748,4</u> 7,4
Яйца, млн шт.	<u>11597,9</u> 100,0	<u>1069,5</u> 9,2	<u>375,5</u> 3,2	<u>1511,5</u> 13,0	<u>1482,0</u> 12,8	<u>1003,2</u> 8,6	<u>274,6</u> 2,7	<u>942,1</u> 8,1

*) В числителе – объем производства, тыс. т, в знаменателе – удельный вес производства в федеральном округе, %.

Источник: составлена и рассчитана по данным Росстата [8].

В дальнейшем большинство регионов Приволжского федерального округа целесообразно специализировать на производстве мяса крупного рогатого скота и птицы, молока и яиц. Возделывание продовольственной пшеницы твердых сортов высокого качества и семян

масличных культур остается прерогативой данного региона. Это должно сопровождаться развитием предприятий мукомольно-крупяной и масложировой промышленности. Особое место займет производство молочной продукции, масла животного и сыра в ассортименте.

Республика Адыгея, Калмыкия, Крым, Краснодарский край, Астраханская, Волгоградская и Ростовская области, входящие в состав Южного федерального округа с численностью населения 16 541 тыс. человек, производят 17,6 % объема валовой продукции сельского хозяйства страны. На площади 13,5 тыс. га в округе производится 26,7 % зерна, полученного в стране, 28,5 % масличных культур, 30,7 % овощей и более 30 % баранины. Производство этой продукции на территории Южного федерального округа делает его лидером в стране (табл. 3).

Таблица 3. Объем и структура производства основных видов сельскохозяйственной продукции в Южном федеральном округе в 2019–2023 гг.

Table 3. Volume and structure of production of the main types of agricultural products in the Southern Federal District in 2019–2023

Продукция	Южный федеральный округ	Республика Адыгея	Республика Калмыкия	Республика Крым	Краснодар- ский край	Астрахан- ская область	Волгоград- ская область	Ростовская область
Зерно	<u>36302,9</u> 100,0	<u>632,5</u> 1,7	<u>667,3</u> 1,8	<u>1555,9</u> 4,3	<u>14046,6</u> 38,7	<u>59,5</u> 0,2	<u>5422,5</u> 14,9	<u>13917,4</u> 38,3
Сахарная свекла	<u>10184,6</u> 100,0	–	–	–	<u>9336,7</u> 91,7	–	<u>42,5</u> 0,4	<u>791,2</u> 7,8
Маслосемена	<u>5404,3</u> 100,0	<u>142,7</u> 2,6	<u>16,5</u> 0,3	<u>150,7</u> 2,8	<u>1676,6</u> 31,0	<u>0,5</u> 0,01	<u>1364,2</u> 25,2	<u>2053,2</u> 38,0
в том числе подсолнечник	<u>4439,2</u> 100,0	<u>107,4</u> 2,4	<u>11,8</u> 0,3	<u>77,2</u> 1,7	<u>1145,6</u> 25,8	–	<u>1235,1</u> 27,8	<u>1862,0</u> 41,9
Картофель	<u>1436,3</u> 100,0	<u>21,4</u> 1,5	<u>3,1</u> 0,2	<u>74,1</u> 5,2	<u>400,7</u> 27,9	<u>394,1</u> 27,4	<u>183,0</u> 12,7	<u>358,1</u> 24,9
Овощи	<u>4201,7</u> 100,0	<u>42,3</u> 1,0	<u>12,2</u> 0,3	<u>182,3</u> 4,3	<u>810,6</u> 19,3	<u>1534,1</u> 36,5	<u>1062,2</u> 25,3	<u>554,2</u> 13,2
Мясо всех видов	<u>1040,8</u> 100,0	<u>29,0</u> 2,8	<u>59,6</u> 5,7	<u>102,8</u> 9,9	<u>433,6</u> 41,7	<u>35,9</u> 3,4	<u>146,0</u> 14,0	<u>233,4</u> 22,4
в т.ч.: говядина	<u>264,8</u> 100,0	<u>2,4</u> 0,9	<u>34,7</u> 13,1	<u>8,5</u> 3,2	<u>73,8</u> 27,9	<u>19,5</u> 7,4	<u>45,5</u> 17,2	<u>80,3</u> 30,3
свинина	<u>246,4</u> 100,0	<u>14,6</u> 5,9	<u>0,8</u> 0,3	<u>22,9</u> 9,3	<u>107,2</u> 43,5	<u>0,2</u> 0,1	<u>40,0</u> 16,2	<u>60,5</u> 24,5
баранина	<u>64,4</u> 100,0	<u>0,5</u> 0,8	<u>22,6</u> 35,1	<u>1,9</u> 2,9	<u>1,9</u> 2,9	<u>13,9</u> 21,6	<u>11,3</u> 17,5	<u>12,2</u> 19,0
мясо птицы	<u>459,5</u> 100,0	<u>11,4</u> 2,5	<u>0,6</u> 0,1	<u>69,3</u> 15,1	<u>249,0</u> 54,2	<u>1,4</u> 0,3	<u>48,4</u> 10,5	<u>79,3</u> 17,3
Молоко	<u>3796,5</u> 100,0	<u>120,5</u> 3,2	<u>48,4</u> 1,3	<u>198,4</u> 5,2	<u>1576,6</u> 41,5	<u>177,9</u> 4,7	<u>572,6</u> 15,1	<u>1099,5</u> 29,0
Яйца, млн шт.	<u>4883,2</u> 100,0	<u>100,7</u> 2,1	<u>14,7</u> 0,3	<u>301,0</u> 6,2	<u>1600,7</u> 32,8	<u>386,5</u> 7,9	<u>806,8</u> 16,5	<u>3,2</u> 0,1

*) В числителе – объем производства, тыс. т, в знаменателе – удельный вес производства в федеральном округе, %.

Источник: составлена и рассчитана по данным Росстата [8].

Помимо этого, в регионе производят 22,0 % сахарной свеклы, более 21,0 % семян масличных культур и 7,3 % картофеля, 9,1 % мяса всех видов, 11,7 % молока и 10,8 % яиц. Краснодарский край, Ростовская и Волгоградская области производят 94,0 % маслосемян в округе. В Краснодарском крае сконцентрировано почти 92,0 % регионального производства сахарной свеклы, на долю картофеля, выращенного в Краснодарском крае, Астраханской и Ростовской областях, приходится 80,2 %.

Стабильным является производство животноводческой продукции. В Южном федеральном округе Республика Калмыкия является лидером по производству баранины. Здесь получают 35,1 % всего объема данного мяса. Около 60 % производства баранины приходится на Астраханскую, Волгоградскую и Ростовскую области. Говядину, свинину и мясо птицы производят в основном в Краснодарском крае, Волгоградской и Ростовской областях. На их долю приходится 78,1 %, 75,4 %, 84,2 % и 82,0 % соответственно.

Учитывая высокий аграрный потенциал Южного федерального округа, в перспективе при сравнительно благоприятных природно-климатических условиях следует полнее удовлетворять потребности местного населения в сельскохозяйственной продукции, сырье и продовольствии. Для этого следует продолжить процесс интенсификации сельского хозяйства, укреплять материально-техническую базу, использовать новые технологии возделывания сельскохозяйственных культур и выращивания животных. Располагая выгодным размещением производства к рынкам сбыта, возможно поставлять свободную продукцию на внутренний и внешний рынки [9].

Выводы

В период реформ во многих регионах страны производство сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия было направлено на самообеспечение, что привело к деспециализации сельскохозяйственного производства и сокращению межрегионального обмена. Негативно отразилась данная ситуация на снабжении отечественными пищевыми продуктами населения и сырьем для пищевой промышленности. Это способствовало регионализации и замкнутости производственных процессов, сокращению агропродовольственного рынка, ослаблению национальной продовольственной безопасности. Поэтому необходимо учитывать существенные различия при унифицированном подходе к использованию элементов межрегионального обмена отдельными видами продукции сельскохозяйственного производства, которые потребуют пересмотра ряда концептуальных положений, связанных с реализацией эффективной аграрной политики и внедрением более совершенной системы управления пространственной организацией отрасли.

В ближайшей перспективе изменение размещения и структуры производства сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия, углубление специализации и концентрации должны определяться государственной политикой, которая имеет возможность изменить процессы пространственной организации труда. Однако это потребует совершенствования организационно-экономического механизма, направленного на эффективность размещения, процесса специализации и углубления концентрации производства отдельных видов сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия в зонах, благоприятных для их производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Указ Президента Российской Федерации от 7 мая 2024 г. № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года». URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/50542>
2. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 28 декабря 2024 г. № 4146-р «Об утверждении новой Стратегии пространственного развития РФ на период до 2030 года с прогнозом до 2036 года». URL: <https://ppt.ru/obzory/vstupayet-v-silu/rasporyazhenie-pravitelstva-rf-28-12-2024-4146-r>
3. Алтухов А. И. Пространственное развитие зернового хозяйства России: монография. М.: Сам Полиграфист, 2022. 880 с. ISBN: 978-5-00166-661-5. EDN: WWLJQS

4. Алтухов А. И. Пространственная организация сельского хозяйства в контексте методологии ее исследования // Экономика сельского хозяйства России. 2020. № 11. С. 77–86. DOI: 10.32651/2011-77. EDN: EJQMGF
5. Алтухов А. И., Папцов А. Г., Винничек Л. Б. и др. Пространственное развитие сельского хозяйства России. М.: Научный консультант, 2021. 324 с. ISBN: 978-5-907330-85-6. EDN: QJUTBC
6. Алтухов А. И., Папцов А. Г., Силаева Л. П. и др. Стратегия пространственного развития отдельных отраслей сельского хозяйства в России. М.: Сам Полиграфист, 2023. 344 с. ISBN: 978-5-00227-022-4. EDN: CCHBCO
7. Алтухов А. И., Силаева Л. П. Устойчивое развитие сельских территорий страны как фактор преодоления современных вызовов в аграрной сфере экономики // Вызовы и современные ответы на проблемы устойчивого развития сельских территорий: сборник статей по материалам Международного научно-практического форума, Краснодар, 26–27 октября 2022 года. Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина, 2022. С. 11–21. EDN: OGRHAQ
8. Федеральная служба государственной статистики (Росстат): официальный сайт. URL: <https://rosstat.gov.ru>
9. Алтухов А. И., Папцов А. Г., Винничек Л. Б. и др. Развитие сельского хозяйства геостратегических территорий России. М.: Научный консультант, 2022. 300 с. ISBN: 978-5-907477-45-2. EDN: XXZXGI

REFERENCES

1. Ukaz Prezidenta Rossiyskoy Federatsii ot 7 maya 2024 g. № 309 «O natsional'nykh tselyakh razvitiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda i na perspektivu do 2036 goda» [Decree of the President of the Russian Federation of May 7, 2024 No. 309 "On the national development goals of the Russian Federation for the period up to 2030 and for the future up to 2036"]. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/50542>. (In Russian)
2. Rasporyazheniye Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 28 dekabrya 2024 g. № 4146-r «Ob utverzhdenii novoy Strategii prostranstvennogo razvitiya RF na period do 2030 goda s prognozom do 2036 goda» [Order of the Government of the Russian Federation of December 28, 2024 No. 4146-r «On approval of the new Strategy for Spatial Development of the Russian Federation for the period up to 2030 with a forecast up to 2036»]. URL: <https://ppt.ru/obzory/vstupayet-v-silu/rasporyazhenie-pravitelstva-rf-28-12-2024-4146-r>. (In Russian)
3. Altukhov A.I. *Prostranstvennoye razvitiye zernovogo khozyaystva Rossii* [Spatial development of grain economy in Russia]: monograph. M.: Sam Polygraphist, 2022. 880 p. ISBN: 978-5-00166-661-5. EDN: WWLJQS. (In Russian)
4. Altukhov A.I. Spatial organization of agriculture in the context of the methodology of its research. *Ekonomika sel'skogo khozyaystva Rossii* [Economics of agriculture in Russia]. 2020. No. 11. Pp. 77–86. DOI: 10.32651/2011-77. EDN: EJQMGF. (In Russian)
5. Altukhov A.I., Paptsov A.G., Vinnichuk L.B. et al. *Prostranstvennoye razvitiye sel'skogo khozyaystva Rossii* [Spatial development of agriculture in Russia]. M.: Nauchnyy konsul'tant, 2021. 324 p. ISBN: 978-5-907330-85-6. EDN: QJUTBC. (In Russian)
6. Altukhov A.I., Paptsov A.G., Silaeva L.P. et al. *Strategiya prostranstvennogo razvitiya otdel'nykh otrasley sel'skogo khozyaystva v Rossii* [Strategy for the spatial development of individual sectors of agriculture in Russia]. M.: Sam Poligrafist, 2023. 344 p. ISBN: 978-5-00227-022-4. EDN: CCHBCO. (In Russian)

7. Altukhov A.I., Silaeva L.P. Sustainable development of rural areas of the country as a factor in overcoming modern challenges in the agricultural sector of the economy. *Vyzovy i sovremennyye otvety na problemy ustoychivogo razvitiya sel'skikh territoriy: sbornik statey po materialam Mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo foruma, Krasnodar, 26–27 oktyabrya 2022 goda* [Challenges and modern responses to the problems of sustainable development of rural areas: a collection of articles based on the materials of the International Scientific and Practical Forum, Krasnodar, October 26–27, 2022]. Krasnodar: Kubanskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet imeni I. T. Trubilina, 2022. Pp. 11–21. EDN: OGRHAQ. (In Russian)

8. *Federal'naya sluzhba gosudarstvennoy statistiki (Rosstat): ofitsial'nyy sayt* [Federal State Statistics Service (Rosstat): official website]. URL: <https://rosstat.gov.ru>.

9. Altukhov A.I., Paptsov A.G., Vinnichuk L.B. et al. *Razvitiye sel'skogo khozyaystva geostrategicheskikh territoriy Rossii* [Development of agriculture Russia's geostrategic territories]. M.: Nauchnyy konsultant, 2022. 300 p. ISBN: 978-5-907477-45-2. EDN: XXZXGI. (In Russian)

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторе

Силаева Лидия Павловна, д-р экон. наук, профессор, гл. науч. сотр., Федеральный научный центр аграрной экономики и социального развития сельских территорий – Всероссийский научно-исследовательский институт экономики сельского хозяйства;

123007, Россия, Москва, Хорошевское шоссе, 35, корп. 2;

l.p.silaeva@vniiesh.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4094-8261>, SPIN-код: 6826-3904

Information about the author

Lidiya P. Silaeva, Doctor of Economics, Professor, Chief Researcher, Federal Scientific Center for Agrarian Economics and Social Development of Rural Areas – All-Russian Research Institute of Agricultural Economics;

123007, Russia, Moscow, 35 Khoroshevskoe highway, 2 building;

l.p.silaeva@vniiesh.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4094-8261>, SPIN-code: 6826-3904

УДК 658.7

DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-2-173-183

EDN: VKOGEK

Научная статья

Разработка российско-китайской омниканальной логистической сети продукции биотоплива

В. Чжан, С. Е. Барыкин✉

Высшая школа сервиса и торговли
Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого
195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Новороссийская, 50

Аннотация. Актуальность данной темы обусловлена важностью решения логистических проблем в условиях глобального роста биотопливной промышленности, повышенной потребности в устойчивом управлении логистическими процессами и снижении углеродного следа. Разработка интегрированных логистических решений становится особенно своевременной, поскольку она позволяет учитывать быстро меняющиеся требования рынка и экологические стандарты. **Пробел в научных исследованиях.** На сегодняшний день существующие подходы к оптимизации мультимодальной логистики имеют существенные недостатки, связанные с несинхронизированным управлением информационными и материальными потоками. Кроме того, наблюдается нехватка эмпирических данных по интеграции омниканальных методов, среди которых применяются: цифровое планирование с использованием алгоритмов искусственного интеллекта; мониторинг углеродных выбросов; оптимизация интермодальных (мультимодальных) перевозок. **Цель исследования.** Цель исследования заключается в разработке модели оптимизации омниканальной логистической сети для биотоплива, основанной на методах анализа данных и искусственного интеллекта. Это позволяет создать эффективный инструмент для управления российско-китайскими логистическими сетями в трансграничном контексте. **Научная новизна исследования.** Разработанная оптимизационная модель на основе данных позволяет значительно снижать логистические затраты, сокращать выбросы углерода и повышать устойчивость цепи поставок. Такой подход расширяет теоретические основы в области логистической омниканальности и открывает новые перспективы для использования современных цифровых технологий в оптимизации транспортных систем. **Научная дискуссия и направления для дальнейшего исследования.** Авторы предлагают обсудить возможности адаптации предложенной модели для решения схожих логистических задач в других отраслях народного хозяйства. Также важным направлением дискуссии является совершенствование организационно-экономических механизмов интеграции цифровых технологий в систему логистики, а именно доработка методов мониторинга углеродных выбросов, что позволит повысить общую эффективность оптимизации логистических процессов.

Ключевые слова: омниканальная логистическая сеть, российско-китайская сеть продукции биотоплива, трансграничная логистика, устойчивость цепей поставок, мультимодальные перевозки

Поступила 10.03.2025, одобрена после рецензирования 20.03.2025, принята к публикации 02.04.2025

Для цитирования. Чжан В., Барыкин С. Е. Разработка российско-китайской омниканальной логистической сети продукции биотоплива // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2025. Т. 27. № 2. С. 173–183. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-2-173-183

Developing Russian-Chinese omnichannel logistics network of biofuel products

W. Zhang, S.E. Barykin✉

Graduate School of Service and Trade
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
195251, Russia, St. Petersburg, 50 Novorossiyskaya street

Abstract. The relevance of the topic is determined by the importance of addressing logistical issues in the context of the global growth of the biofuel industry, the increased need for sustainable management of logistics processes, and the reduction of the carbon footprint. The development of integrated logistics solutions is particularly timely, as it enables the consideration of rapidly changing market demands and environmental standards. **Research Gap.** Currently, existing approaches to optimizing multimodal logistics have significant shortcomings related to the unsynchronized management of information and material flows. In addition, there is a lack of empirical data on the integration of omnichannel methods, among which the following are applied: Digital planning using artificial intelligence algorithms; Carbon emission monitoring; Optimization of intermodal (multimodal) transportation. **Research Objective.** The objective of the research is to develop an optimization model for an omnichannel logistics network for biofuel, based on data analysis methods and artificial intelligence. This approach enables the creation of an effective tool for managing Russian-Chinese logistics networks in a cross-border context. **Scientific Novelty.** The data-driven optimization model developed significantly reduces logistics costs, cuts carbon emissions, and enhances the resilience of the supply chain. This approach expands the theoretical foundations in the field of omnichannel logistics and opens up new prospects for the use of modern digital technologies in optimizing transportation systems. **Scientific Discussion and Future Research Directions.** The authors propose to discuss the possibilities of adapting the suggested model to solve similar logistical challenges in other sectors of the economy. An important direction of the discussion is also the improvement of organizational and economic mechanisms for the integration of digital technologies into the logistics system, particularly the refinement of carbon emissions monitoring methods, which will enhance the overall efficiency of optimizing logistical processes.

Keywords: omnichannel logistics network, Russian-Chinese biofuel products, cross-border logistics, supply chain resilience, multimodal transportation

Submitted 10.03.2025,

approved after reviewing 20.03.2025,

accepted for publication 02.04.2025

For citation. Zhang W., Barykin S.E. Developing Russian-Chinese omnichannel logistics network of biofuel products. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2025. Vol. 27. No. 2. Pp. 173–183. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-2-173-183

ВВЕДЕНИЕ / INTRODUCTION

The term “biofuel products” explicitly narrows the focus to the tangible, marketable items – such as biodiesel or bioethanol – that are being distributed. So, the article topic “Developing the Russian-Chinese Omnichannel Logistics Network of Biofuel Products” clearly indicates that the research centers on the logistics aspects related to the distribution and handling of the finished biofuel commodities. The focus of the research is on the network for handling the final biofuel products rather than the broader concept of bioenergy. The phrase “logistics network of biofuel” might be interpreted in a broader sense. It can imply an analysis of the entire biofuel sector, including production, distribution, and even technological aspects related to bioenergy.

As a clean and renewable form of energy, biofuel has gradually become an important component of global energy strategies in the context of the transition of the global energy mix towards renewable energy and a low-carbon economy. Overuse of traditional fossil fuels has led to serious environmental problems such as climate change, air pollution and resource depletion. In order to meet these challenges, the international community has set targets to reduce carbon emissions and promote green energy development. Biofuel (e.g., bioethanol) has become one of the key areas in the global energy transition because of its low carbon emissions, renewability and wide application prospects. According to the International Energy Agency (IEA) [1], biofuel share of global renewable energy consumption is rising every year and is expected to account for more than 20% of global energy consumption to 2030.

As globally important energy producing and consuming countries, China and Russia have significant complementarities and potential for cooperation in the field of biofuel. Russia has abundant bioethanol resources (e.g., agricultural waste, raw materials such as grain by-products), and its wide land area provides favorable conditions for the cultivation and collection of biomass resources. China is one of the world's largest energy consumers, and with rapid economic development, the demand for clean energy continues to increase. The Chinese government has proposed a "dual carbon target" [2] (i.e., carbon peaking by 2030 and carbon neutrality by 2060) [3], and has made biofuel an important element in realizing this target, and China's technology for processing into bioethanol and scale are relatively mature. Under the cooperation framework of the Belt and Road Initiative and the Eurasian Economic Union, Russian-Chinese Biofuel cross-border trade is becoming more and more frequent, and the logistics demand for renewable energy products such as bioethanol is growing rapidly.

Traditional cross-border logistics networks usually use single channel (linear transport structure) for energy transportation, without high degree of synergy among various logistics links, and information flow, capital flow and logistics operation are relatively independent, resulting in low overall operational efficiency. By building omnichannel logistics network [4,5], it can break the isolated island effect of traditional supply chain [5,6], realize the real-time monitoring of cross-border logistics data, and improve the adaptability of logistics network. Therefore, author's suggestions to build a Russian-Chinese omnichannel logistics network of biofuel products to cope with the complexity and dynamics of Russian-Chinese biofuel transport and to provide important support for Russian-Chinese energy cooperation and the realization of global sustainable development goals are of great practical significance.

The aim of research is to develop an optimized omnichannel logistics network framework to improve the efficiency of collaboration in the Russian-Chinese logistics network of biofuel products. By optimizing the transparency, traceability and responsiveness of the logistics network, this research seeks to reduce operational costs, enhance the sustainability and resilience of the supply chain, and ultimately provide theoretical guidance and decision-making support for the efficient development of Sino-Russian energy trade.

Research subject focuses on exploring how to improve the synergistic efficiency and sustainability of the Russian-Chinese omnichannel logistics network of biofuel products through the construction and optimization of omnichannel logistics network.

Research object focuses around the Russian-Chinese omnichannel logistics network of biofuel products, aiming to explore the deep integration mechanism of omnichannel logistics network model in the complex cross-border trade environment.

The scientific novelty of the research is reflected in the following aspects.

1. The research breaks through the traditional scope of application of omnichannel logistics network and introduces it into the Russian-Chinese biofuel products for the first time, proposing a new type of logistics optimization strategy applicable to energy trade.

2. The research establishes a real-time data-driven logistics network collaborative optimization mechanism based on real-time data, integrating logistics data, policy information and market demand to improve the real-time decision-making ability and adaptability of cross-border logistics.

3. For the first time, the research incorporates environmental indicators such as carbon emission and energy consumption in the optimization model of Russian-Chinese omnichannel logistics network of biofuel products, which provides scientific basis for the development of low-carbon economy and green energy logistics, and enhances the practical significance and policy value of the research.

4. Research on the use of modern logistics information technology (e.g., Internet of Things, big data analysis) to enhance the level of intelligence in the logistics network, improve the efficiency of logistics resource allocation, and then enhance the overall operational effectiveness of the supply chain.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ / MATERIALS AND METHODS

Policy and market environment directly affect the feasibility and stability of cross-border supply chains. Market demand for bioenergy is extremely dependent on international oil prices [7, 8] and policy drivers (implementation of China's "dual-carbon" policy [9,10]). The expansion of the China-Europe liner train [11] provides new channel for the transportation of biofuel products, and the "One Belt, One Road" initiative [12] also promotes the cooperation between China and Russia in the field of energy, which provides policy protection for the synergistic development of the biofuel logistics network.

Related data show that in 2023, China produced about 3.4 million tons of biofuel ethanol. [13] China produces about 1.35 billion tons of agricultural waste per year, of which a significant portion can be used for bioenergy production. The "14th Five-Year Plan" for a modern energy system explicitly proposes to increase the proportion of non-fossil energy consumption. [14] By 2030, China's carbon dioxide emissions per unit of GDP will be reduced by more than 65% compared with 2005, and the proportion of non-fossil energy in primary energy consumption will reach about 25%. [15]

Omnichannel logistics network refers that an intelligent logistics system with high integration and multi-level synergy. Information network [16] is the key to realize the intelligence and synergy of Russian-Chinese omnichannel logistics network of biofuel products, and enhance the transparency, traceability and decision-making ability of logistics process through digital technology [17]. Big Data Analytics [18] optimizes the resource allocation and decision-making capability of the logistics network by analyzing historical and real-time data [19]. By analyzing demand data for biofuel products in the Chinese market, can forecast demand for the next three months and adjust production and transportation plans. Big data analytics also be used to optimize the layout of warehousing facilities [20] and the scheduling of transportation means to improve the utilization efficiency of logistics resources. The research suggests adopting blockchain technology to build a smart payment system [21] to improve the transparency and liquidity of cross-border transactions.

The research adopted a systematic approach to construct [22] and optimize the Russian-Chinese omnichannel logistics network of biofuel products, and the authors proposed an optimization framework based on an omnichannel logistics network (Fig. 1. Russian-Chinese omnichannel logistics network of biofuel products) covering three levels, namely, the physical level, the information level, and the decision-making level, which are in collaboration with each other.

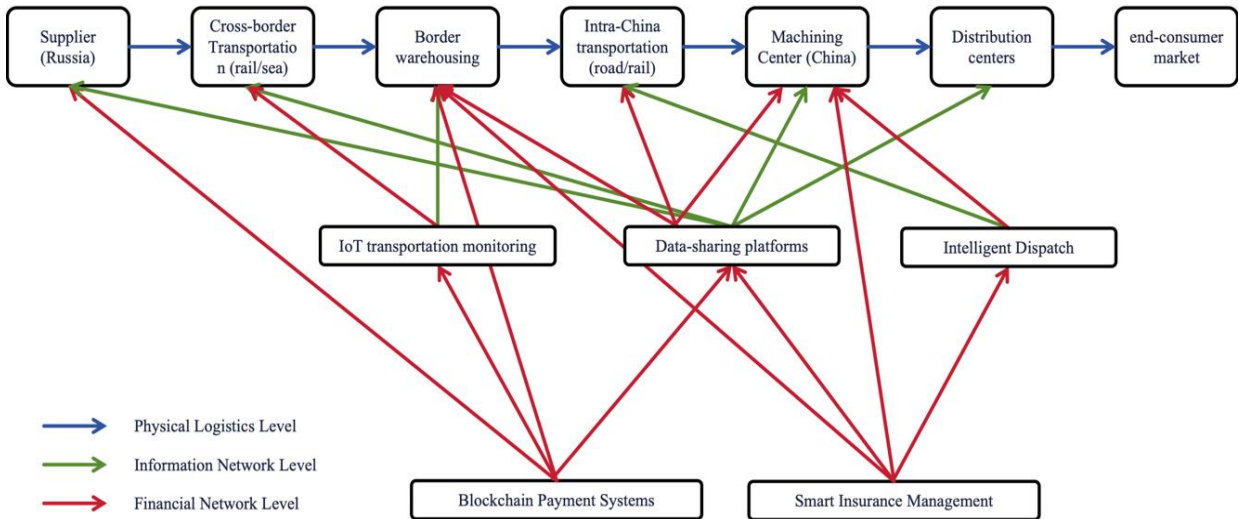


Рис. 1. Российско-китайская омниканальная логистическая сеть продукции биотоплива

Fig. 1. Russian-Chinese omnichannel logistics network of biofuel products

The model sets three major optimization objectives to improve the operational efficiency of logistics network of biofuel products as a whole. The aim of the model is to improve the economic feasibility of the Russian-Chinese logistics network of biofuel product and to provide a scientific basis for cross-border logistics management and supply chain optimization.

The main objectives of this model include:

- (1) Minimizing logistics costs to ensure cost-effective cross-border transportation and storage of biofuel products.
- (2) Minimizing carbon emissions to reduce the environmental impact of the biofuel product transport and conform to the requirements of green and sustainable development.
- (3) Maximize supply chain resilience and enhance the adaptability of the supply chain to changes in market demand, policy changes and emergencies.

In the model construction, firstly defined the core nodes in the logistics network (Table 1. Core nodes in the logistics network).

Таблица 1. Основные узлы логистической сети

Table 1. Core nodes in the logistics network

Logistics Network Nodes	$i \in S$, Supply points (e.g. Russian biofuel production sites)
	$i \in D$, Demand points (e.g. Chinese biofuel processing sites)
	$k \in W$, Warehouse centers (e.g., logistics hubs on the Russian-Chinese border)
Logistics Flow Variables	x_{ijk} , Flow of goods from supply point i to demand point j through storage center k
	y_{ik} , Supply points i Flow of goods transported directly to storage centers k
	z_{kj} , Storage center k Flow of goods transported to demand point j
Mode of Transportation	T_r, T_s, T_a denotes the volume of rail, road, and sea transportation, respectively
	C_r, C_s, C_a denotes the unit cost of transportation by rail, road, and sea, respectively
	E_r, E_s, E_a denotes carbon emissions per unit of rail, road, and sea transportation, respectively
Cost of Storage and Distribution	C_k is the unit storage cost for k of storage centers
	C_m is the cost of the distribution terminal

With the synergy of physical, information and decision-making levels, the model achieves the intelligence, efficiency and sustainability of the Russian-Chinese logistics network of biofuel products with the optimization objectives of minimizing the logistics cost, minimizing the carbon

emission and maximizing the resilience of the supply chain. By constructing this mathematical model, we are able to systematically optimize the cross-border logistics network, improve the operational efficiency of the supply chain, provide scientific decision-making support for the government and enterprises, and thus promote the in-depth development of Russian-Chinese green energy cooperation.

Minimize logistics costs

$$\min C = \sum_i \sum_k y_{ik} C_{ik} + \sum_k \sum_j z_{kj} C_{kj} + \sum_k S_k C_k + \sum_m D_m C_m \quad (1)$$

Minimize carbon emissions

$$\min E = \sum_i \sum_k y_{ik} E_{ik} + \sum_k \sum_j z_{kj} E_{kj} + \sum_m D_m E_m \quad (2)$$

Maximize supply chain resilience

$$\max R = \sum_n P_n S_n - \sum_p F_p \quad (3)$$

The constraints ensure the rational operation of the logistics network and make the optimization objective feasible in the real environment. The supply-demand balance constraint ensures the matching of logistics flows between the nodes of the logistics network, i.e., the output of raw materials at the supply point must be equal to the reception at the storage center, and the logistics flows at the storage center must also match the final demand point to avoid supply-demand imbalance.

$$\sum_k y_{ik} = \sum_j x_{ijk}, \quad \forall i \in S \quad (4)$$

$$\sum_j z_{kj} = \sum_i x_{ijk}, \quad \forall k \in W \quad (5)$$

At the same time, it is necessary to ensure that in each storage center the total cargo flow x_{ijk} cannot exceed the maximum storage capacity of the storage center C_k , avoiding operational inefficiencies or cost increases due to overloaded storage.

Constraint transport mode restraints specify the ratios between different modes of transport (e.g. rail, road and sea) that need to satisfy $T_r + T_s + T_a \leq T_{max}$, and $T_r, T_s, T_a, \geq 0$. For example, the proportion of road transportation should not exceed a certain ceiling in order to reduce the carbon footprint, while the use of rail and sea transportation needs to be maintained at a certain level in order to increase the sustainability of the supply chain.

Carbon emissions E needs to be less than the total GHG emissions of the entire supply chain E_{max} , ensuring that the logistics network is optimized for transportation efficiency while meeting green development goals. To adapt to market changes, market demand constraints are adopted to ensure that the omnichannel logistics network optimization scheme maintains stable operations despite fluctuations in market demand.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ / RESEARCH RESULTS

Based on the results of simulation data calculations, we evaluated the optimization of the Russian-Chinese omnichannel logistics network of biofuel products in terms of cost, sustainability and supply chain resilience.

In the developed omni-channel logistics network optimization model for biofuel, data analysis methods and artificial intelligence techniques are integrated to achieve comprehensive and adaptive management of logistics processes. More specifically:

• **Data Analysis:** Data analysis methods are used to collect, process, and interpret information on logistics flows, including raw material intake, finished product distribution, as well as monitoring carbon emissions for various modes of transport (for example, road and rail transport). This analysis makes it possible to identify key nodes in the network, evaluate transportation efficiency, detect bottlenecks in the supply chain, and simulate optimization scenarios based on statistical patterns and empirical data.

• **Artificial Intelligence:** Artificial intelligence techniques are employed to develop intelligent routing and scheduling algorithms. They provide:

◦ **Intelligent Planning:** An automated selection of optimal routes and transportation modes based on current data regarding demand, transport capacity, and environmental performance indicators.

◦ **Adaptive Optimization:** AI algorithms allow the logistics network to be adjusted promptly in response to changing market conditions and transport environments by taking into account carbon emission dynamics and the need to reduce logistics costs.

◦ **Forecasting and Decision-Making:** On the basis of historical data and scenario modeling, AI generates forecasts regarding changes in logistics flows and aids decision-making to further enhance the network.

Thus, the combination of data analysis methods and artificial intelligence algorithms enables the creation of a multifunctional model that not only optimizes the management of the Russian-Chinese logistics networks but also supports sustainable development by lowering emissions and improving resource redistribution efficiency.

Total transportation cost in the optimized omnichannel logistics network is approximately \$7.368 million, accounting for the largest proportion of the overall supply chain operating costs. Through data analysis (Fig. 2. Distribution of total transportation volume by different modes of transportation), it is found that rail transportation accounts for the highest proportion, followed by sea transportation and road transportation. Rail transport dominates cross-border long-distance transportation due to its low-cost and large-capacity features, but is not flexible enough, while road transport has irreplaceable advantages in short-distance and terminal distribution, even in view of its higher costs. Sea transport has a relatively low usage rate, but it has the lowest unit transportation cost and is suitable for long-distance and high-volume transportation. Based on these results, it is proposed to further increase the proportion of sea transport, optimize the combination of multimodal transport and reduce redundant transport costs through intelligent scheduling.

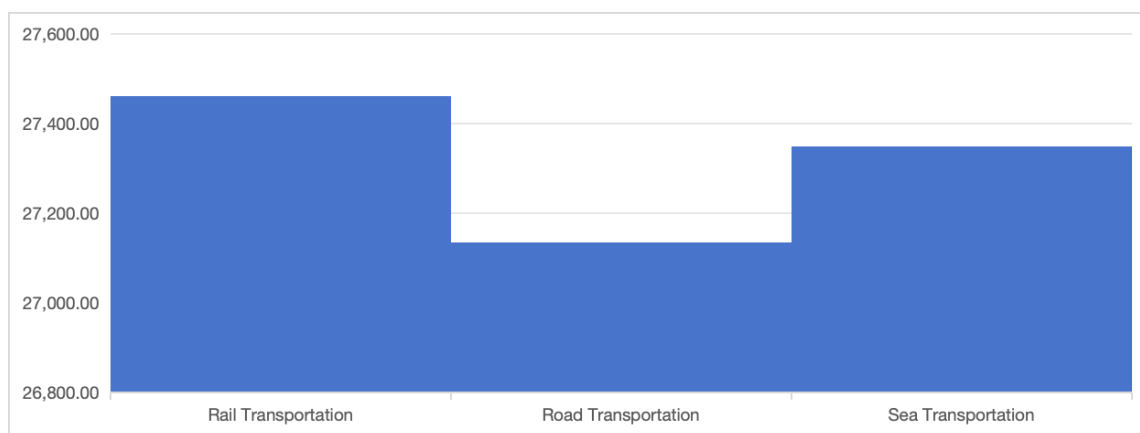


Рис. 2. Распределение общего объема перевозок по видам транспорта

Fig. 2. Distribution of total transportation volume by different modes of transportation

Total carbon emission of the omnichannel logistics network reaches 1.537 million tons of carbon dioxide, of which the carbon emission of road transportation is the highest and that of railroad transportation is the lowest (Fig. 3. Carbon Emission Distribution of Omnichannel Logistics Network). From the simulation data, road transportation has the highest share of carbon emissions, indicating that it consumes more energy in short-distance transportation and distribution, and at the same time its carbon emission factor is higher. And rail transportation has the lowest percentage, indicating that it has more environmental advantages in long-distance large-scale transportation. Therefore, in order to reduce the carbon footprint of the omnichannel logistics network, it is possible to optimize the multimodal transport scheme, further increase the proportion of rail and sea transport used, and adopt new energy vehicles in the short-distance distribution link.

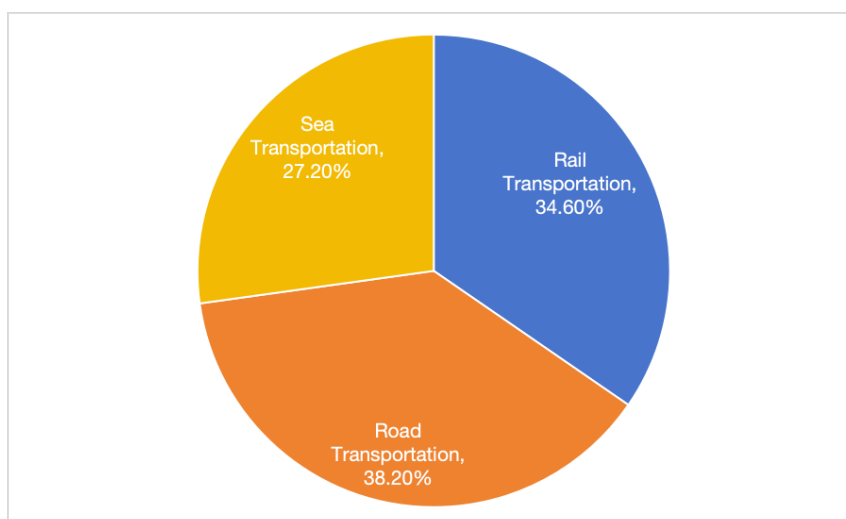


Рис. 3. Распределение выбросов углерода в омниканальной логистической сети

Fig. 3. Carbon Emission Distribution of Omnichannel Logistics Network

The calculation results of the supply chain resilience index show that (due to more simulation data, only part of the sample is shown) (Fig. 4. Supply chain resilience index), the stability score of the supply chain is 0.758 (out of 1.0), the overall resilience is strong, but there is still room for improvement. The demand side of the market is relatively stable, but there are large fluctuations on the supply side, which are affected by elements such as climate, policies and energy market prices. In addition, storage capacity is sufficient, but there is more room for optimization of logistics scheduling.

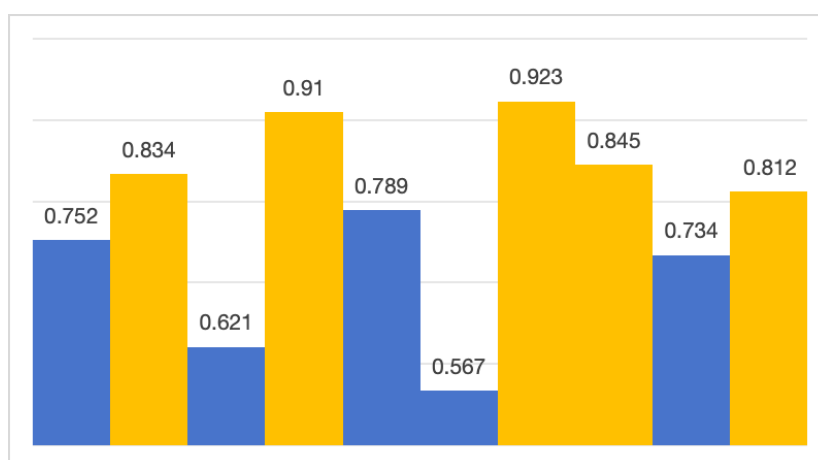


Рис. 4. Индекс устойчивости цепи поставок

Fig. 4. Supply chain resilience index

Among the current modes of transportation, the volume of rail, road and sea transport is basically balanced, but rail transportation accounts for slightly more. Rail transportation offers advantages in terms of carbon emissions and cost control, but its fixed scheduling affects the flexibility of logistics. Sea transportation has a low utilization rate, which may be mainly due to the absence of suitable port facilities at some logistics network nodes, resulting in inefficient trans-shipment. Therefore, the research suggests increasing the proportion of sea-rail intermodal transport and establishing an intelligent transit and storage system at border crossings to optimize the connection between different modes of transport. At the same time, automated scheduling systems should be applied in the terminal distribution chain to improve the efficiency of “last-mile” logistics and reduce distribution time and costs.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ / CONCLUSION

In this research, an innovative model for optimizing an omnichannel logistics network has been developed, based on data analysis. The use of this solution enables the minimization of logistics costs and a significant reduction in the carbon footprint, contributing to the development of theoretical principles in the field of omnichannel logistics in supply chains and establishing a solid foundation for further research and practical application in conditions of sustainable development.

By integrating the physical level, information level and decision-making level, an efficient, intelligent and cooperative logistics network framework is constructed, which enriches the theoretical system of cross-border logistics management. The framework is not only applicable to both Russian and Chinese biofuel products, but also provides theoretical references for other cross-border energy products.

The results of simulation data analysis show that the total carbon emissions of the Russian-Chinese omnichannel logistics network of biofuel products are 1.537 million tons, with road transport accounting for the highest share (38.2%), maritime transport (34.6%), and railroads (27.2%). Due to the high unit carbon emissions of road transportation, despite its flexibility, the environmental advantages in long-distance transportation are significantly lower than those of rail and sea transportation. Therefore, the current logistics model needs to be further optimized to reduce reliance on road transport and increase the share of green modes of transport to achieve more sustainable cross-border biofuel products supply chain management.

In the long view, the optimization of the Russian-Chinese omnichannel logistics network of biofuel products needs to pay attention to economic benefits, and must be based on the perspective of sustainable development to promote the construction of a low-carbon and digitalization development. The optimization scheme of research is not only in conformity with China's “dual-carbon” strategy, but also provides a green and sustainable development direction for the global cross-border logistics network. In the future, omnichannel logistics network optimization should be further combined with intelligent scheduling system, AI predictive analysis, carbon emission monitoring and multimodal transportation optimization, so as to ensure the stability of the supply chain while realizing the green and low-carbon transformation and the in-depth development of cross-border energy cooperation.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. International Energy Agency. Renewables 2024: Analysis and forecast to 2030. IEA. 2024. 177 p. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/17033b62-07a5-4144-8dd0-651cdb6caa24/Renewables2024.pdf> (accessed 05.02.2025)

2. Jiang Q., Yin Z. The optimal path for China to achieve the “Dual Carbon” target from the perspective of energy structure optimization. *Sustainability*. 2023. Vol. 15(13). 10305. P. 32. DOI: 10.3390/su151310305

3. PRCEE, Environmental Defense Fund. China's Peak Carbon Neutrality Policies and Actions, *Policy Research Center for Environment and Economy*. 2023. p. 41. URL: <http://www.prcee.org/yjcg/yjbg/202403/W020240313623893353900.pdf> (accessed 10.02.2025)
4. Barykin S.E., Sergeev S.M., Provotorov V.V., et al. Sustainability Analysis of Energy Resources Transport Based on A Digital ND Logistics Network. *Engineered Science*. 2024. Vol. 29: 1093. P. 16. DOI: 10.30919/es1093
5. Barykin S.E., Sergeev S.M., Provotorov V.V., et al. Energy efficient digital omnichannel marketing based on a multidimensional approach to network interaction. *Frontiers in Energy Research*. 2022. Vol. 10: 946588. P. 8. DOI: 10.3389/fenrg.2022.946588
6. Barykin S.E., Smirnova E.A., Chzhao D., et al. Digital echelons and interfaces within value chains: end-to-end marketing and logistics integration. *Sustainability*. 2021. Vol. 13(24): 13929. P. 18. DOI: 10.3390/su132413929
7. IEA Bioenergy. Potential contribution of bioenergy to the world's future energy demand. *IEA Bioenergy*. 2007. P. 12. URL: <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2013/10/Potential-Contribution-of-Bioenergy-to-the-Worlds-Future-Energy-Demand.pdf> (accessed 06.02.2025)
8. Su C.W., Wang X.Q., Tao R., et al. Do oil prices drive agricultural commodity prices? Further evidence in a global bio-energy context. *Energy*. 2019. Vol. 172. Pp. 691–701. DOI: 10.1016/j.energy.2019.02.028
9. Jiang B., Raza M.Y. Research on China's renewable energy policies under the dual carbon goals: A political discourse analysis. *Energy Strategy Reviews*. 2023. Vol. 48: 101118. P. 10. DOI: 10.1016/j.esr.2023.101118
10. Zhu Y., Hu Y., Zhu Y. Can China's energy policies achieve the "dual carbon" goal? A multi-dimensional analysis based on policy text tools. *Environment, Development and Sustainability*. 2024. Pp. 1–40. DOI: 10.1007/s10668-024-05190-4
11. CAITEC, CASS. Report on the Development of China's Pilot Free Trade Zones (2013-2023), *Chinese Academy of International Trade and Economic Cooperation*. 2023. P. 70. URL: <https://www.caitec.org.cn/upfiles/file/2023/10/20231127095033478.pdf> (accessed 06.02.2025)
12. High-quality joint construction of the Belt and Road to build a connectivity partnership. *Advisory Committee of the "Belt and Road" International Cooperation Summit Forum*. 2021. P. 49. URL: <http://munich.china-consulate.gov.cn/zgzt/111a/202112/P020211222776477377927.pdf> (accessed 07.02.2025)
13. BEIPA. Annual Report on the Development of China's Biomass Industry, 2024 – Abstract Version. *Biomass Energy Industry Promotion Association*. 2024. URL: <https://www.beipa.org.cn/newsinfo/7147401.html> (accessed 01.02.2025)
14. National Energy Administration. "Modern Energy System Planning for the 14th Five-Year Plan. *National Energy Administration*. 2022. P. 41. URL: https://www.nea.gov.cn/1310524241_16479412513081n.pdf (accessed 01.02.2025)
15. China's Policies and Actions to Counter Climate Change 2022 Annual Report. *Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China*. 2022. P. 55. URL: <https://www.mee.gov.cn/ywgz/ycqhbh/syqhbh/202210/W020221027551216559294.pdf> (accessed 01.02.2025)
16. Jiang W. An intelligent supply chain information collaboration model based on internet of things and big data. *IEEE access*. 2019. Vol. 7. Pp. 58324–58335. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2913192
17. Khan M., Parvaiz G.S., Dedahanov A.T., et al. The impact of technologies of traceability and transparency in supply chains. *Sustainability*. 2022. Vol. 14(24): 16336. P. 15. DOI: 10.3390/su142416336
18. Monino J.L. Data value, big data analytics, and decision-making. *Journal of the Knowledge Economy*. 2021. Vol. 12. Pp. 256–267. DOI: 10.1007/s13132-016-0396-2

19. Sazu M.H., Jahan S.A. Can big data analytics improve the quality of decision-making in businesses? *Iberoamerican Business Journal*. 2022. Vol. 6(1). Pp. 04–27. DOI: 10.22451/5817.ijb2022.vol6.1.11063
20. Yan Z., Ismail H., Chen L., et al. The application of big data analytics in optimizing logistics: a developmental perspective review. *Journal of Data, Information and Management*. 2019. Vol. 1. Pp. 33–43. DOI: 10.1007/s42488-019-00003-0
21. Ahmed M.R., Meenakshi K., Obaidat M.S., et al. Blockchain based architecture and solution for secure digital payment system. *ICC 2021-IEEE International Conference on Communications*. Montreal, IEEE. 2021. Pp 1–6. DOI: 10.1109/ICC42927.2021.9500526
22. Rossi P.H., Lipsey M.W., Freeman H.E. *Evaluation: A systematic approach*. SAGE Publications. 2003. P. 480.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Вклад авторов:

С. Е. Барыкин – научное руководство исследованием, постановка целей и задач исследования;
В. Чжан – подбор методического инструментария, практическая апробация и описание, подготовка начального варианта текста.

Contribution of the authors:

S.E. Barykin – scientific supervision of the study, setting the goals and objectives of the study;
W. Zhang – selection of methodological tools, practical testing and description, preparation of the initial version of the text.

Информация об авторах

Чжан Вэнье, аспирант, Высшая школа сервиса и торговли, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого;

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Новороссийская, 50;

ZhangWenye@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3433-248X>, SPIN-код: 8789-2275

Барыкин Сергей Евгеньевич, д-р экон. наук, профессор, Высшая школа сервиса и торговли, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого;

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Новороссийская, 50;

sbe@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9048-009X>, SPIN-код: 9382-2074

Information about the authors

Zhang Wenye, Post-graduate Student, Graduate School of Service and Trade, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University;

195251, Russia, St. Petersburg, 50 Novorossiyskaya street;

ZhangWenye@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3433-248X>, SPIN-code: 8789-2275

Sergey E. Barykin, Doctor of Economic Sciences, Professor, Graduate School of Service and Trade, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University;

195251, Russia, St. Petersburg, 50 Novorossiyskaya street;

sbe@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9048-009X>, SPIN-code: 9382-2074

УДК 33:328.185

DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-2-184-198

EDN: YCNFII

Научная статья

Экономические последствия коррупции: влияние на инвестиционный климат и развитие бизнеса

М. И. Елаев

Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы
117198, Россия, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

Аннотация. В данной статье освещаются механизмы, через которые коррупция влияет на ключевые экономические показатели и условия для предпринимательской деятельности. Автор рассматривает, как коррупционные риски трансформируют инвестиционный климат, формируют дополнительные издержки для бизнеса и затрудняют реализацию долгосрочных проектов. В ходе исследования были выявлены особенности воздействия коррупционных схем на малые и средние предприятия, а также прослежена связь между коррупционными практиками и возникновением теневых структур в экономике. Кроме того, в работе анализируется влияние системной коррупции на распределение бюджетных средств и оценку стратегических госпрограмм. На основе сравнительного анализа научных источников предлагаются конкретные рекомендации по внедрению антикоррупционных мер, повышающих прозрачность рыночных процедур и стимулирующих приток инвестиций. Формируемые выводы могут быть востребованы специалистами в области экономики, представителями госуправления и экспертами, занимающимися исследованием социально-экономических реформ.

Ключевые слова: коррупция, инвестиционный климат, развитие бизнеса, экономический рост, госзакупки, антикоррупционные меры, теневой рынок, государственные финансы, конкурентоспособность, инновационный потенциал

Поступила 12.02.2025, одобрена после рецензирования 07.03.2025, принята к публикации 13.03.2025

Для цитирования. Елаев М. И. Экономические последствия коррупции: влияние на инвестиционный климат и развитие бизнеса // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2025. Т. 27. № 2. С. 184–198. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-2-184-198

Original article

Economic consequences of corruption: impact on investment climate and business development

M.I. Elaeu

Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba
117198, Russia, Moscow, 6 Miklukho-Maklaya street

Abstract. This article highlights the mechanisms through which corruption affects key economic indicators and the business environment. The author examines how corruption risks transform the investment climate, create additional costs for business and impede the implementation of long-term projects. The study identifies the specifics of the impact of corruption schemes on small and medium-sized enterprises and traces the link between corrupt practices and the emergence of shadow structures in the economy. In addition, the paper analyses the impact of systemic corruption on the allocation of budget

funds and the evaluation of strategic state programmes. Based on a comparative analysis of scientific sources, the paper offers specific recommendations for the implementation of anti-corruption measures that increase the transparency of market procedures and stimulate the inflow of investments. The conclusions formed may be in demand by economic specialists, representatives of public administration and experts involved in the study of socio-economic reforms.

Keywords: corruption, investment climate, business development, economic growth, public procurement, anti-corruption measures, shadow market, public finance, competitiveness, innovation potential

Submitted 12.02.2025,

approved after reviewing 07.03.2025,

accepted for publication 13.03.2025

For citation. Elaev M.I. Economic consequences of corruption: impact on investment climate and business development. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2025. Vol. 27. No. 2. Pp. 184–198. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-2-184-198

ВВЕДЕНИЕ

Коррупция выступает одним из наиболее острых вызовов современным экономикам, препятствуя их сбалансированному развитию и порождая системные искажения в сфере распределения ресурсов. Само понятие «коррупция» охватывает широкий спектр проявлений – от мелкого взяточничества до масштабных злоупотреблений должностными полномочиями. В ряде научных исследований подчеркивается, что коррупционные практики способны проникать во все уровни управления и приводить к стойким деформациям рыночного механизма.

С точки зрения экономической науки важность анализа коррупции определяется тем, что в условиях недобросовестных договоренностей и непрозрачных процедур компании вынуждены нести дополнительные затраты, а государства теряют значительную часть налоговых поступлений и международного авторитета. Особенно остро эта проблема встает для развивающихся государств, где несовершенная институциональная среда создает благоприятную почву для коррупционных сделок, тормозит формирование среднего класса и сдерживает приток прямых иностранных инвестиций. В то же время даже развитые экономики не застрахованы от резонансных коррупционных дел, способных подорвать доверие к политическим институтам и негативно сказаться на их инвестиционной привлекательности.

С практической точки зрения актуальность темы «Экономические последствия коррупции: влияние на инвестиционный климат и развитие бизнеса» связана с необходимостью выработки стратегий, направленных на усиление прозрачности и укрепление конкурентных принципов в деловой среде. Несмотря на значительное количество международных соглашений и национальных законодательных мер, проблема коррупции остается одним из ключевых факторов, затрудняющих поступательное экономическое развитие. Ведь неэффективное расходование бюджетных средств и бюрократические барьеры автоматически ведут к снижению качества государственных услуг и деформируют рыночные стимулы для бизнеса.

Цель настоящего исследования – проанализировать, каким образом коррупционные практики влияют на макроэкономические параметры и инвестиционную активность, а также определить, в какой степени они трансформируют деловую среду. Исходя из данной цели в статье решаются следующие задачи:

1. Охарактеризовать основные формы проявления коррупции и их взаимосвязь с инвестиционным климатом.

2. Исследовать влияние коррупции на функционирование предприятий малого, среднего и крупного бизнеса, выявив дополнительные издержки и риски.

3. Оценить макроэкономические последствия, в том числе изменение структуры госфинансов и динамики экономического роста.

4. Предложить комплекс мер, способных снизить распространенность коррупции и способствовать улучшению инвестиционного климата.

Таким образом, работа будет сфокусирована на проблеме, затрагивающей одновременно интересы общества, государства и представителей бизнеса. Важность выбранного направления исследования подтверждается актуальными данными международных организаций и научных публикаций, указывающими на потребность в многоаспектном подходе к борьбе с коррупционными феноменами. Именно такой подход позволяет выработать системные рекомендации, направленные на укрепление прозрачности и повышение экономической эффективности в долгосрочной перспективе.

1. ВЛИЯНИЕ КОРРУПЦИИ НА ИНВЕСТИЦИОННЫЙ КЛИМАТ

Коррупция как социально-экономическое явление способна оказывать многостороннее воздействие на динамику инвестиций в различных регионах и странах. В научной литературе подчеркивается, что коррупционные практики не только подрывают доверие к государственным институтам, но и существенно искажают структуру инвестиционных потоков, негативно влияя на совокупный экономический рост [1]. Ниже рассмотрим ключевые механизмы, через которые коррупция способна изменять инвестиционный климат, а также проиллюстрируем их посредством примеров и данных исследований авторитетных научных и международных организаций.

Ухудшение доверия инвесторов к государственным институтам. Одним из главных факторов, определяющих инвестиционную привлекательность страны, является степень предсказуемости и стабильности ее правовых и административных структур [2]. Инвесторы стремятся минимизировать риски, связанные с внезапными законодательными изменениями, административными барьерами и непрозрачностью госрегулирования. Коррупция же существенно ослабляет доверие к государственным институтам, поскольку инвесторы нередко сталкиваются с непредвиденными расходами, связанными с подкупом чиновников, и отсутствием гарантированной защиты прав собственности.

При высоком уровне коррупции компании вынуждены закладывать дополнительные расходы в свои бизнес-планы, так как отлаженные механизмы правоприменения заменяются теневыми схемами и личными связями. Это особенно ощутимо в странах с неустойчивой политической системой, где частая смена руководящих лиц и высокий уровень бюрократии создают предпосылки для систематической коррумпированности государственного аппарата. В результате международные и отечественные инвесторы начинают с опасением относиться к реализации долгосрочных проектов, предпочитая либо сокращать объем вложений, либо полностью отказываться от них в пользу более прозрачных и предсказуемых рынков.

Искажение структуры инвестиционных потоков и рост транзакционных издержек. Коррупция способна влиять на структуру распределения инвестиций и приводить к тому, что капитал направляется не в те сферы, которые обладают максимальным потенциалом роста, а в те области, где существуют наиболее удобные условия для взяточничества или получения частных выгод [2]. Формально может казаться, что инвестиционная активность

в стране сохраняется, однако реальное качество инвестиций и их вклад в общественное благосостояние снижаются.

Согласно исследованиям Всемирного банка, в условиях отсутствия прозрачности и при наличии системной коррупции бизнес сталкивается со значительным увеличением транзакционных издержек – затрат времени и ресурсов, необходимых для согласования документов, прохождения формальных и неформальных процедур. Даже если общий объем прямых иностранных инвестиций (ПИИ) не демонстрирует резкий спад, его эффективная отдача снижается из-за необходимости постоянно адаптироваться к коррупционным практикам. Более того, в ряде случаев компании могут воспользоваться коррупцией в качестве конкурентного преимущества, предлагая взятки для ускорения получения разрешений или лицензий. Однако этот временный «выигрыш» часто оборачивается долгосрочными потерями для всей экономической системы: растет неравенство условий для отдельных участников рынка, рушатся стимулы к инновациям, формируются монополизированные структуры.

Подрыв стабильности деловой среды и возникновение институциональной неопределенности. Характерной чертой инвестиционного климата в коррумпированных юрисдикциях является высокий уровень институциональной неопределенности, проявляющийся в слабом соблюдении контрактных обязательств и непредсказуемости правоприменительной практики. Инвесторы, особенно те, кто ориентирован на долгосрочные проекты, стремятся к прозрачному и стабильному деловому климату, где соблюдаются принципы верховенства права и существует минимальный риск внезапной национализации или репрессивных мер со стороны госорганов. При наличии коррупции такие гарантии практически отсутствуют.

На фоне постоянных неформальных платежей и личных договоренностей между бизнесом и бюрократией компании могут ощущать временную выгоду от «сотрудничества» с представителями власти. Однако подобная ситуация нестабильна: при смене политических групп, приходе новых чиновников или резком реформировании госаппарата бизнесы, ранее опиравшиеся на неофициальные связи, сталкиваются с непредсказуемыми рисками. Результатом становится ограниченная способность частного сектора прогнозировать экономическую конъюнктуру, что ведет к снижению количества долгосрочных проектов и миграции капитала в более безопасные юрисдикции.

Примеры стран с разным уровнем коррупции и их инвестиционным климатом. Согласно индексу восприятия коррупции (Corruption Perceptions Index), публикуемому ежегодно международной организацией Transparency International, существует заметная разница в уровне коррупции между развивающимися и развитыми странами. Например, государства Скандинавии, традиционно занимающие верхние позиции в рейтинге, характеризуются не только низкой коррупционной составляющей, но и стабильным притоком прямых иностранных инвестиций, что связано с прозрачными правилами ведения бизнеса и высокими стандартами отчетности.

В то же время в ряде стран с переходной экономикой (например, в некоторых государствах Восточной Европы и Центральной Азии) наблюдается системная коррупция, которая нередко становится основной преградой для притока капитала из-за рубежа. Даже в случаях, когда правительства декларируют проведение реформ и улучшение инвестиционного климата, отсутствие реальных антикоррупционных механизмов сдерживает развитие национальной экономики. В таких условиях инвесторы предпочитают вкладывать деньги в секторы с быстрым оборотом капитала (например, в торговлю сырьевыми товарами) или же искать пути для вывода средств в офшорные зоны, избегая долгосрочных инфраструктурных проектов.

Интересен пример некоторых азиатских экономик, где при относительно высоком уровне коррупции государству удавалось поддерживать быстрые темпы роста и сохранять значительный приток инвестиций (например, в определенные периоды в Китае). Однако более глубокий анализ показывает, что в подобных моделях большую роль играл сочтенный эффект инвестиционных льгот, дешевой рабочей силы и масштабных государственных программ, направленных на стимулирование промышленного роста. По мере усиления требований международного сообщества к прозрачности финансовых сделок и повышающегося уровня конкуренции за высококвалифицированный капитал подобные модели теряют свою эффективность, а недостатки в институциональной среде становятся все более ощутимыми.

Системное влияние на международный инвестиционный имидж страны. Помимо прямых экономических издержек, коррупция наносит ущерб и репутации государства на международной арене. Когда страна регулярно фигурирует в докладах о высоком уровне коррупции, это влияет на решения глобальных компаний и фондов при выборе места для размещения капитала. Например, суверенные рейтинговые агентства в своих оценках учитывают уровень коррупционных рисков как один из индикаторов общей надежности и предсказуемости экономической системы.

Как показывают исследования, страна с низким рейтингом управления (governance) вынуждена предлагать инвесторам дополнительные стимулы в виде налоговых льгот, упрощенных процедур найма и т. п., чтобы компенсировать риск коррумпированности. При этом подобные меры зачастую приводят к дисбалансу в налогообложении и усугубляют неравенство в отношении различных категорий предпринимателей. В долгосрочной перспективе репутационные потери и финансовые затраты на «компенсационные механизмы» могут превысить выгоды от искусственно привлеченных инвестиций, усиливая экономическую уязвимость страны.

Социально-экономические последствия снижения инвестиционной активности. Наконец, важно подчеркнуть, что снижение инвестиционной активности вследствие коррупции имеет более широкие социально-экономические последствия. Замедляется модернизация инфраструктуры, а инновационные проекты, требующие больших первоначальных вложений, остаются нереализованными или переносятся в другие регионы. Это не только ограничивает создание новых рабочих мест, но и препятствует повышению уровня квалификации рабочей силы и развитию человеческого капитала.

Коррупция также обостряет социальное расслоение, поскольку значительная часть населения остается без доступа к качественным услугам, а госфинансы зачастую распределяются на проекты, выгодные лишь узким группам элит. В результате формируется замкнутый круг: недостаток прозрачности в госрасходах подрывает доверие общества к властям, а низкий уровень доверия лишь укрепляет коррупционные практики. Все это прямым образом сказывается на перспективах привлечения инвестиций, так как экономическая нестабильность, обострение неравенства и социальные протесты отпугивают потенциальных партнеров, ориентированных на долгосрочное сотрудничество.

Таким образом, коррупция оказывает комплексное и во многом деструктивное влияние на инвестиционный климат. Она не только повышает риски для инвесторов и увеличивает транзакционные издержки, но и создает институциональную неопределенность, способную подрывать стабильность всей деловой среды. В ряде случаев отдельные бизнес-структуры могут адаптироваться к существующим коррупционным схемам, однако это приводит лишь к кратковременным выгодам и усугубляет системные проблемы страны. Понимание механизмов,

через которые коррупция воздействует на инвестиционную привлекательность, является ключевым моментом для выработки эффективных антикоррупционных мер, направленных на формирование благоприятной и устойчивой экономической среды. Именно комплексный подход, основанный на тщательном анализе институциональных условий с опорой на международный опыт, способен обеспечить долгосрочные результаты в деле повышения инвестиционного климата и стимулирования экономического роста.

2. ВОЗДЕЙСТВИЕ КОРРУПЦИИ НА РАЗВИТИЕ БИЗНЕСА

Коррупция оказывает значительное влияние на функционирование предпринимательских структур в самых разных секторах экономики и неоднозначно воздействует на факторы, определяющие конкурентоспособность фирм. В научной литературе этот феномен рассматривается как один из наиболее серьезных барьеров, препятствующих развитию малого и среднего бизнеса, а также вызывающих дополнительные издержки в крупных компаниях [4]. Ниже будут рассмотрены механизмы, через которые коррупция негативно сказывается на бизнес-среде, а также обсуждено, каким образом она влияет на конкуренцию, инновационную активность и общую эффективность рыночных процессов.

Влияние коррупции на малый и средний бизнес. Малые и средние предприятия (МСП) наиболее уязвимы перед давлением со стороны коррумпированных чиновников или неправомерными требованиями при получении лицензий и разрешений [5]. По сравнению с крупными корпорациями МСП обладают ограниченными финансовыми, организационными и правовыми ресурсами, что делает их более подверженными коррупционным рискам и вынуждает идти на непредвиденные расходы.

Во многих странах процедура регистрации бизнеса, получение различных сертификатов и согласований часто сопровождается бюрократическими барьерами. При наличии коррупции эти барьеры могут искусственно усложняться, так как недобросовестные представители власти создают преднамеренные препятствия, чтобы вынудить предпринимателей обращаться к «посредникам» или давать взятки. Для небольших компаний такие расходы становятся более ощутимыми, чем для крупных корпораций, поскольку объемы выручки в МСП ограничены, а возможность компенсировать затраты за счет масштабирования деятельности весьма невелика.

Кроме того, малые и средние предприятия нередко сталкиваются со сложностями при получении кредитов и гарантий, необходимых для роста и расширения производства. При высоком уровне коррупции банки и другие финансовые институты могут проявлять предвзятость при принятии решений о выдаче займов, руководствуясь не только экономической целесообразностью, но и личными интересами и неформальными договоренностями. Это приводит к тому, что перспективные, но не имеющие «связей» предприниматели оказываются в неравных конкурентных условиях по сравнению с теми, кто может обеспечить лоббирование своих интересов через коррупционные каналы.

Дополнительные издержки для бизнеса в условиях коррупции. Коррупция порождает множество формальных и неформальных расходов, которые ложатся на компании независимо от их размера [6]. Одним из наиболее распространенных каналов негативного влияния является система взяток и «откатов» (kickbacks), возникающих при заключении коммерческих сделок и государственных контрактов. Бизнесу приходится предусматривать в бюджете отдельные статьи на «неофициальные платежи» разным структурам для ускорения бюрократических процедур или получения привилегированного положения на рынке.

Такая практика формирует замкнутый круг: компании, участвующие в коррупционных схемах, нередко нуждаются в дополнительных ресурсах на поддержание связи с чиновниками, а сами чиновники стремятся сохранить статус-кво, создавая еще больше административных барьеров и усложняя регулятивную систему. По оценкам Всемирного банка, в странах с высоким уровнем взяточничества доля «скрытых платежей» может составлять значительную часть оборота фирмы, что тормозит инвестиционную активность и ограничивает возможности для масштабирования.

Дополнительные издержки выражаются не только в денежных выплатах. В условиях коррупции компаниям приходится тратить время и ресурсы на постоянное взаимодействие с посредниками, переделывание документации и адаптацию к неписаным правилам игры. Это увеличивает время вывода продукции на рынок и снижает качество оказания услуг, так как руководство вынуждено уделять большое внимание бюрократическим процедурам в ущерб работе над технологическими инновациями или поискам новых клиентов.

Влияние на конкуренцию и рыночные механизмы. Коррупция в бизнес-среде существенно искажает конкурентные условия, поскольку те компании, которые могут позволить себе «купить» привилегии, получают заметные преимущества перед фирмами, действующими в правовом поле. В ряде случаев речь идет о доступе к льготному финансированию, ускоренном прохождении таможенных и регуляторных процедур, а также о лояльном отношении контрольно-надзорных органов.

Подобные искажения формируют неравномерное распределение рыночных возможностей и порождают ситуацию «хронической» неэффективности. Фирмы, сумевшие встроиться в коррупционные сети, тратят меньше усилий на оптимизацию производства и инновации, так как их положение уже обеспечивается привилегированным доступом к ресурсам или административным льготам. С другой стороны, компании, не желающие участвовать в коррупционных схемах, вынуждены либо повышать собственные издержки (в том числе юридические), либо уходить с рынка.

В долгосрочной перспективе это ведет к сокращению числа новых игроков и снижению конкуренции. Насыщенный коррупцией рынок, как правило, характеризуется низкой скоростью технологических нововведений, поскольку стимулы к развитию и совершенствованию продуктов заменяются неформальными договоренностями и стремлением заручиться поддержкой влиятельных чиновников. В результате выигрывают краткосрочные интересы немногих, в то время как общественное благосостояние и общий уровень конкурентоспособности экономики страдают.

Роль крупных компаний в условиях коррупции. Крупные корпорации, обладающие значительными финансовыми и политическими ресурсами, могут в определенных случаях извлечь выгоду из коррумпированного окружения, используя его для укрепления собственных позиций. Имея штат юристов, экономистов и специалистов по взаимодействию с государственными органами, такие предприятия способны легче адаптироваться к бюрократическим нормам и формировать неформальные связи с представителями власти.

Однако подобное «сотрудничество» часто вредит развитию отрасли в целом. Крупные фирмы могут лоббировать законодательные инициативы, устанавливающие высокие барьеры входа на рынок для конкурентов, или получать государственные заказы на условиях, исключающих прозрачный процесс торгов. Для экономики это означает рост монополизма и вытеснение средних игроков, которые не имеют сопоставимых ресурсов для оплаты «транзакционных» услуг чиновников.

Помимо этого, в коррумпированной среде крупные компании часто испытывают давление со стороны нечестных должностных лиц, требующих неофициальных платежей за продолжение сотрудничества. Суммы взяток могут исчисляться значительными величинами, что в конечном итоге снижает рентабельность предприятия и может даже привести к его банкротству при неблагоприятной конъюнктуре. Таким образом, коррупция несет риски даже для самых сильных рыночных игроков, подрывая стабильность их хозяйственной деятельности и не способствуя формированию здоровой конкуренции.

Долгосрочные последствия для бизнес-среды. Анализ научных работ показывает, что воздействие коррупции на бизнес имеет комплексный и долговременный характер. Если коррупционные практики становятся «нормой» экономических отношений, то предпринимателям приходится строить долгосрочные стратегии с учетом постоянных непубличных расходов и рисков, связанных с возможной сменой «правил игры» при смене чиновников или правительственной верхушки.

Это негативно сказывается на инвестиционной привлекательности страны, ограничивает масштабы международного сотрудничества и снижает доверие к национальной экономике. Более того, системная коррупция ослабляет правовое поле, делая судебную защиту прав собственности непрозрачной и непредсказуемой. В итоге бизнес предпочитает действовать в «теневой» сфере либо выбирать более благоприятные юрисдикции для реализации инвестиционных проектов.

Кроме того, предприниматели, ориентированные на инновационные решения, сталкиваются с дополнительными препятствиями, так как развитие новых продуктов и технологий требует значительных первоначальных вложений и прозрачной среды для долгосрочных операций. Если же значительная часть ресурсов уходит на коррупционные платежи или юридическую «подстраховку» от бюрократического произвола, то стимулы к инновациям снижаются. Таким образом, коррупция не только замедляет развитие конкретных фирм, но и препятствует общему технологическому прогрессу.

Значение прозрачной деловой среды для эффективного роста. Обеспечение прозрачных, честных и предсказуемых условий для бизнеса рассматривается многими учеными как один из ключевых факторов экономического роста и социальной стабильности. Для развития малого и среднего бизнеса особенно важно снижение бюрократических преград и усиление ответственности чиновников, принимающих решения по разрешительным документам, проверкам и доступу к кредитным ресурсам.

В условиях прозрачной среды компании могут направлять больше усилий на развитие собственных конкурентных преимуществ, инвестировать в человеческий капитал, технологии и маркетинговые стратегии вместо того, чтобы тратить ресурсы на «теневые» формы взаимодействия с госструктурами. Более того, честная конкуренция стимулирует появление новых игроков на рынке и усиливает мотивацию существующих фирм к повышению качества продукции и сервисов, что в конечном итоге способствует экономическому росту на национальном уровне.

По мнению ряда исследователей, внедрение антикоррупционных мер и реформ, направленных на снижение бюрократической нагрузки, способно создавать благоприятные условия для инноваций и укрепления рыночного потенциала. Усиление законодательной базы, прозрачность госзакупок и открытая конкуренция формируют среду, в которой бизнес развивается без искусственных барьеров и непредсказуемых издержек, а общество получает выгоду от более широкого спектра качественных товаров и услуг.

Таким образом, коррупция оказывает комплексное негативное воздействие на развитие бизнеса, ограничивая возможности роста для малых и средних предприятий, искажая конкуренцию и повышая совокупные издержки предпринимательского сектора. Крупные компании при определенных обстоятельствах могут использовать коррумпированные каналы для укрепления позиций, однако и они в конечном счете становятся уязвимыми в непредсказуемой среде, где требования чиновников не всегда соответствуют формальному праву. Для обеспечения устойчивого развития, стимулирования инноваций и укрепления рыночных механизмов необходимо формировать прозрачную и предсказуемую деловую среду, в которой коррупционные практики не только осуждаются, но и преследуются законом. Научные исследования подтверждают, что только в таких условиях бизнес может эффективно расти, вносить вклад в экономическое развитие и повышать качество жизни населения.

3. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ КОРРУПЦИИ

Коррупция оказывает многоуровневое влияние на экономическое развитие государств, сказываясь как на ключевых макроэкономических показателях, так и на долгосрочных перспективах роста и благосостояния населения. В научных исследованиях выделяют несколько основных направлений влияния коррупции: это торможение экономического роста, увеличение масштабов теневой экономики, негативное воздействие на государственные финансы и в конечном счете формирование неблагоприятных условий для устойчивого развития.

Замедление экономического роста и расширение теневого сектора. Одним из широко обсуждаемых последствий коррупционных практик является замедление экономического роста [7]. Когда крупные и мелкие предприятия сталкиваются с коррупционными барьерами, они вынуждены нести дополнительные расходы на «неофициальные» платежи и сложные бюрократические процедуры. В результате денежные средства, которые могли бы быть направлены на расширение производства, повышение квалификации персонала или внедрение инноваций, уходят на поддержание нелегальных каналов взаимодействия с чиновниками.

Более того, высокие затраты на коррупционные схемы стимулируют уход бизнеса «в тень», что означает уменьшение налоговых поступлений в казну и подрыв фискальной стабильности. В условиях, когда предпринимателям приходится выбирать между длительными и непредсказуемыми бюрократическими процедурами и «быстрыми» неофициальными путями решения проблем, многие компании предпочитают работать без официальной регистрации или укрывать часть доходов. Увеличение масштаба теневой экономики приводит к тому, что государство получает менее точные статистические данные о реальном уровне экономической активности, затрудняя принятие обоснованных решений в сфере макроэкономической и социальной политики.

Негативное воздействие на государственные финансы и распределение ресурсов. Коррупция также существенно влияет на эффективное распределение государственных ресурсов [7]. В ситуациях, когда принятие решений о государственных закупках или инвестиционных программах определяется не объективными критериями выгоды, а личными интересами и коррупционными соглашениями, общественные ресурсы нередко направляются на проекты, не приносящие долгосрочного эффекта для экономики.

Исследования показали, что в коррумпированных системах бюджетные средства часто уходят на дорогие, но малоэффективные инициативы, позволяющие получить «откаты» через завышение смет и закупочных цен. При этом стратегически важные секторы — образование, здравоохранение, инфраструктура — могут получать недостаточное финансирование, что ослабляет человеческий капитал и социальную стабильность в долгосрочной перспективе. Недофинансирование сферы образования, например, снижает качество подготовки рабочих и специалистов, что в свою очередь уменьшает конкурентоспособность отечественных предприятий на мировом рынке.

Дополнительно коррупция в сфере государственных финансов снижает доверие населения к институтам власти, так как громкие коррупционные скандалы и неэффективное расходование бюджета порождают сомнения в способности государства обеспечивать прозрачное и справедливое использование общественных средств. Снижение уровня доверия к государственным институтам чревато усилением социального напряжения и рисками политической дестабилизации.

Долгосрочные последствия для экономического развития и благосостояния населения. В долгосрочной перспективе коррупция формирует системные ограничения для развития, связанные с ограничением инновационного потенциала и снижением привлекательности страны для квалифицированных специалистов и инвесторов. Накопленный в результате коррупции дефицит доверия к правовым институтам делает экономику более уязвимой к внешним шокам и препятствует формированию устойчивого среднего класса.

Если в краткосрочной перспективе коррупционные доходы могут рассматриваться некоторыми группами как способ «быстрого обогащения», то в долгосрочном плане такое распределение ресурсов ведет к росту неравенства и усилению социальной поляризации. При этом часть населения, не имеющая доступа к коррупционным схемам, оказывается в заведомо проигрышном положении, что формирует недовольство и снижает уровень социальной интеграции.

Для экономики, ориентированной на инновации и долгосрочный рост, крайне важно, чтобы распределение инвестиций осуществлялось на основе прозрачных правил и адекватных оценок рисков. Коррупционные практики же нарушают эту логику, поощряя решение вопросов «по знакомству» и сводя к минимуму ценность конкурентных процедур. В результате у предпринимателей пропадает стимул заниматься научно-исследовательской и опытно-конструкторской деятельностью, если вложения в коррупционные механизмы кажутся более выгодными и менее рискованными.

Комбинированный эффект на социально-экономические процессы. Суммарное влияние коррупции на экономические показатели можно рассматривать как комбинированный эффект нескольких взаимосвязанных факторов: сокращение темпов роста, истощение фискального потенциала государства, отток инвестиций и квалифицированных кадров. В итоге, если коррупцию не удастся контролировать, она способна стать одним из главных препятствий на пути к устойчивому развитию, расширению рынков и повышению качества жизни населения.

Дополнительно важно подчеркнуть, что неблагоприятные экономические последствия коррупции редко ограничиваются одними лишь финансовыми потерями или снижением ВВП. Они включают в себя и упущенные возможности для формирования инновационного общества, где человеческий капитал является главным драйвером прогресса. Ограничение таких возможностей влияет на все сферы жизни — от уровня образования и здравоохранения до состояния деловой среды и предпринимательской культуры.

Таким образом, коррупция формирует многообразие негативных экономических последствий, начиная с замедления роста и увеличения масштабов теневого сектора, заканчивая неэффективным распределением ресурсов и снижением качества человеческого капитала. Научные исследования акцентируют внимание на том, что эти эффекты могут усугубляться под влиянием системных проблем, связанных с несовершенной правовой базой, слабым институтом независимой судебной власти и недостаточно эффективными мерами по предупреждению коррупционных практик. Отсутствие прозрачных механизмов регулирования и контроля за распределением государственных средств затрагивает фундаментальные основы экономической стабильности, а в долгосрочной перспективе препятствует развитию инноваций и повышению благосостояния населения. Именно поэтому борьба с коррупцией рассматривается многими исследователями как один из важнейших приоритетов экономической и социальной политики, определяющий траекторию развития государств в глобализирующемся мире.

4. МЕРЫ ПО СНИЖЕНИЮ КОРРУПЦИИ И УЛУЧШЕНИЮ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

Развитие антикоррупционных мер и формирование благоприятного экономического климата взаимосвязаны: чем выше уровень прозрачности и подотчетности в системе управления, тем более предсказуемыми становятся условия для инвесторов и предпринимателей. В научной литературе выделяется несколько ключевых направлений, способных снизить коррупционные риски и одновременно стимулировать рост экономической активности.

Обзор эффективных антикоррупционных стратегий. Одной из базовых основ в борьбе с коррупцией является повышение открытости и подотчетности государственных институтов перед обществом [9]. Это достигается за счет внедрения электронных систем предоставления услуг (e-government), позволяющих сократить личные контакты предпринимателей и граждан с чиновниками, а также через упрощение и стандартизацию административных процедур. Подобный подход не только уменьшает возможности для взяточничества, но и снижает бюрократические издержки, ускоряя принятие решений и повышая прозрачность сделок.

Исследования также указывают на важность независимых органов, занимающихся расследованием коррупционных правонарушений. Когда соответствующие структуры не подчиняются напрямую политическому руководству и обладают достаточными ресурсами, они в состоянии объективно проверять деятельность чиновников и пресекать коррупционные практики на самых высоких уровнях власти. При этом значительную роль играет и судебная система: эффективность расследований повышается в разы, если суды независимы от административного давления и не вовлечены в коррупционные схемы.

Помимо институциональных мер, серьезным фактором выступает формирование антикоррупционной культуры, которая подразумевает неприятие обществом взяточничества и других форм незаконного обогащения. Внимание к нравственной стороне вопроса, а также к механизмам общественного контроля (например, посредством свободных СМИ или организаций гражданского общества) способствует повышению общей прозрачности деловой среды и создает условия, при которых коррупция перестает быть «частью обыденности».

Роль международных организаций и соглашений. На международном уровне существенным вкладом в борьбу с коррупцией являются различные конвенции, в частности Конвенция ООН против коррупции (UNCAC), а также инициативы Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР), направленные на противодействие подкупу

иностранных должностных лиц. Участие государств в подобных соглашениях повышает прозрачность процедур, связанных с транснациональными инвестициями, и стимулирует создание унифицированных правовых стандартов.

Помимо этого, такие организации, как Всемирный банк и Международный валютный фонд, оказывают консультативную и финансовую помощь странам, внедряющим реформы для укрепления институциональной среды. Речь может идти о совершенствовании налоговой системы, реформировании таможенного контроля и повышении квалификации аудиторов. Согласованность международных усилий позволяет более эффективно выявлять и пресекать коррупционные потоки, связанные с отмыванием средств и незаконным выводом капитала в офшорные зоны.

Однако внедрение международных стандартов требует системной адаптации к национальной правовой базе. Если государство формально подписывает конвенции и принимает антикоррупционные законы, но не обеспечивает их реальное применение, положительный эффект будет минимален. Важно сочетать внешние инициативы с комплексными мерами внутри страны, включая стимулирование общественной дискуссии и принятие правительством обязательств по обеспечению полной независимости антикоррупционных институтов.

Рекомендации по улучшению инвестиционного климата и развитию бизнеса. Усиление мер против коррупции тесно переплетается с улучшением инвестиционного климата: чем прозрачнее и надежнее правовая система, тем охотнее компании вкладывают средства в долгосрочные проекты [10]. Одной из ключевых рекомендаций является упрощение административных процедур – от регистрации предприятий до получения лицензий и разрешений. Сокращение бюрократических барьеров снижает возможные коррупционные риски, так как уменьшает количество «контактных точек» бизнеса и чиновников.

Другой важный элемент – обеспечение прозрачности и конкуренции в сфере государственных закупок. Если проекты распределяются через открытые электронные платформы, где все участники могут видеть критерии отбора и поданные заявки, то шансы на неформальные соглашения и «откаты» существенно снижаются. Использование современных информационных технологий помогает отслеживать ход тендерных процедур в реальном времени и оперативно реагировать на нарушения, что дополнительно укрепляет доверие участников рынка.

Для стимулирования развития бизнеса и снижения уровня коррупции также важно поддерживать добросовестную конкуренцию. В частности, антимонопольные органы должны контролировать действия крупных игроков и пресекать попытки монополизации рынка при помощи коррупционных схем. Установление четких правил игры без избыточных привилегий для отдельных компаний создает более здоровую экономическую среду, в которой стартовые возможности не зависят от наличия «связей» во властных структурах.

Немалую роль в повышении прозрачности играет и корпоративная ответственность самих компаний. Разработка собственных кодексов этики, регулярный внутренний аудит, а также публикация отчетов об антикоррупционных мерах могут стать дополнительным стимулом к формированию честных деловых отношений. Такие практики повышают доверие не только со стороны потребителей, но и со стороны партнеров и инвесторов, что в совокупности укрепляет общую репутацию бизнеса и страны в целом.

Таким образом, борьба с коррупцией предполагает сочетание системных реформ государственной и судебной систем с превентивными мерами, ориентированными на общественную и корпоративную культуру. При должном внимании к вопросам прозрачности, открытой конкуренции, к улучшению электронных сервисов и повышению независи-

мости антикоррупционных институтов государства получают шанс не только снизить уровень коррупции, но и существенно улучшить экономическую среду. Такая комплексная стратегия, подкрепленная международным сотрудничеством и научно обоснованным подходом, способствует долгосрочному росту, укреплению доверия к институтам власти и повышению общего уровня благосостояния.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренный анализ подтвердил, что коррупционные практики оказывают всестороннее воздействие на экономическую систему, затрагивая как приток инвестиций, так и динамику развития бизнеса. Проведенное исследование позволило выявить, что коррупция не только увеличивает транзакционные издержки и риски для предпринимателей, но и формирует неблагоприятные условия для долгосрочных проектов, особенно в контексте неэффективного распределения государственных ресурсов. Малые и средние предприятия, наиболее уязвимые к бюрократическим барьерам, испытывают непропорционально высокую нагрузку, что в итоге замедляет общий рост национальной экономики. Параллельно выяснилось, что макроэкономические последствия коррупции выражаются в сокращении потенциала для инноваций, усилении теневого сектора и снижении инвестиционной привлекательности государства.

Систематизация собранных данных указывает на необходимость комплексного подхода к преодолению коррупционных проявлений. Одной из первоочередных мер выступает упрощение бюрократических процедур, в том числе перевод наиболее востребованных государственных услуг в электронный формат. Вдобавок к этому целесообразно усиливать независимость антикоррупционных органов и судебной системы, ведь прозрачное и справедливое правосудие повышает доверие к институтам власти. Не менее важными оказываются шаги по совершенствованию механизмов госзакупок, где открытая конкуренция и публичность результатов торгов способны снизить риски неформальных сделок и улучшить инвестиционный климат. В целом реализация обозначенных предложений поможет выстроить более здоровую экономическую среду и повысить устойчивость национального хозяйства к внутренним и внешним вызовам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров Г. А., Вязкина И. В., Скворцова Г. Г. Коррупционная и криминальная составляющие в факторах, обуславливающих инвестиционный климат региона // Региональная экономика: теория и практика. 2014. № 14. С. 10–22.
2. Сахаров А. Г. Рамочная концепция ОЭСР в области инвестиций: многосторонний механизм совершенствования глобального инвестиционного климата // Вестник международных организаций: образование, наука, новая экономика. 2016. Т. 11. № 4. С. 7–35. DOI: 10.17323/1996-7845-2016-04-07
3. Алтухов А. В. Влияние коррупции на развитие инвестиционной деятельности предприятий в России // Пробелы в российском законодательстве. 2011. № 2.
4. Каирбекова А., Абрамов Р. А. Влияние коррупции на развитие предпринимательства в России // Human Progress. 2021. Т. 7. № 2. С. 6. DOI: 10.34709/HP.172.6
5. Гурунян Т. В. Пути преодоления коррупции как угрозы безопасности инновационной активности малого и среднего предпринимательства // Векторы благополучия: экономика и социум. 2015. № 3(18). С. 84–92.

6. Осипенко О. В. Корпоративная коррупция: сущность, формы, способы противодействия // Труд и социальные отношения. 2011. Т. 22. № 12. С. 3–11. EDN: OQRVTR
7. Пылаева Т. Влияет ли коррупция на устойчивость экономического роста? // Балтийский регион. 2011. № 4. С. 49–59. DOI: 10.5922/2074-9848-2011-4-5
8. Рукина И. М. Влияние коррупции на состояние экономики государства // Контуры глобальных трансформаций: политика, экономика, право. 2009. Т. 2. № 6. С. 43–48. EDN: MWGQYT
9. Родюкова Т. Н. Открытость органов государственной власти как способ повышения эффективности государственного управления в части противодействия коррупции // Гуманитарные, социально-экономические и общественные науки. 2024. № 11. С. 83–88. DOI: 10.24412/2220-2404-2024-11-29
10. Хрусталева Б. Б., Горбунов В. Н., Мурсалимова Н. Н., Асяев И. Ю. Факторы инвестиционного климата региона // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2-1. С. 265. EDN: UHXAOP

REFERENCES

1. Alexandrov G.A., Vyakina I.V., Skvortsova G.G. Corruption and criminal components in the factors that determine the investment climate of the region. *Regional'naya ekonomika: teoriya i praktika* [Regional Economics: Theory and Practice]. 2014. No. 14. Pp. 10–22. (In Russian)
2. Sakharov A.G. OECD Framework Concept in the field of investment: a multilateral mechanism for improving the global investment climate. *Vestnik mezhdunarodnykh organizatsiy: obrazovaniye, nauka, novaya ekonomika* [Bulletin of International Organisations: Education, Science, New Economy]. 2016. Vol. 11. No. 4. Pp. 7–35. DOI: 10.17323/1996-7845-2016-04-07. (In Russian)
3. Altukhov A.V. Influence of corruption on the development of investment activity of enterprises in Russia. *Probely v rossiyskom zakonodatel'stve* [Gaps in Russian legislation]. 2011. No. 2. (In Russian)
4. Kairbekova A., Abramov R.A. Influence of Corruption on the Development of Entrepreneurship in Russia. *Human Progress*. 2021. Vol. 7. No. 2. P. 6. DOI: 10.34709/IM.172.6. (In Russian)
5. Gurunyan T.V. Ways to overcome corruption as a threat to the security of innovation activity of small and medium-sized businesses. *Vektory blagopoluchiya: ekonomika i sotsium* [Vectors of well-being: economy and society]. 2015. No. 3(18). Pp. 84–92. (In Russian)
6. Osipenko O.V. Corporate corruption: essence, forms, ways of counteraction. *Trud i sotsial'nyye otnosheniya* [Labour and Social Relations]. 2011. Vol. 22. No. 12. Pp. 3–11. EDN: OQRVTR. (In Russian)
7. Pylaeva T. Does corruption affect the sustainability of economic growth? *Baltic region*. 2011. No. 4. Pp. 49–59. DOI: 10.5922/2074-9848-2011-4-5. (In Russian)
8. Rukina I.M. Influence of corruption on the state economy. *Kontury global'nykh transformatsiy: politika, ekonomika, pravo* [Contours of global transformations: politics, economics, law]. 2009. Vol. 2. No. 6. Pp. 43–48. EDN: MWGQYT. (In Russian)
9. Rodyukova T.N. Openness of organisations of state government as a way to improve the effectiveness of state government in part of corruption protection. *Gumanitarnyye, sotsial'no-ekonomicheskiye i obshchestvennyye nauki* [Humanities, Socio-Economic and Social Sciences]. 2024. No. 11. Pp. 83–88. DOI: 10.24412/2220-2404-2024-11-29. (In Russian)

10. Khrustalev B.B., Gorbunov V.N., Mursalimova N.N., Asyaev I.Yu. Factors of investment climate of region. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education]. 2015. No. 2–1. P. 265. EDN: UHXAOP. (In Russian)

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторе

Елаев Мансур Ибрахимович, магистрант 2-го курса направления «Управление персоналом» экономического факультета, Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы; 117198, Россия, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6; mansur.elaev@yandex.ru, SPIN-код: 5862-5828

Information about the author

Mansur I. Elaev, 2nd year Master's student of Human Resources Management, Faculty of Economics, Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba; 117198, Russia, Moscow, 6 Miklukho-Maklaya street; mansur.elaev@yandex.ru, SPIN-code: 5862-5828

Валерию Дударовичу Дзидзоеву – 75 лет



Известный ученый, талантливый педагог, популяризатор профессиональных знаний Валерий Дударович Дзидзоев в марте 2025 г. отметил 75-летний юбилей. Его по праву можно назвать одним из плодотворных ученых-историков Северной Осетии и Северного Кавказа. Он известен также как политолог и специалист в сфере юриспруденции.

С детства В. Д. Дзидзоев мечтал стать профессиональным историком. В то время в Северной Осетии сформировалась сильная историческая школа, представители которой оказали на Валерия Дударовича большое влияние. С 1970-го по 1975 г. он студент исторического факультета Северо-Осетинского государственного университета им. К. Л. Хетагурова. С 1976 г. занимается научно-исследовательской работой. Его интересы были связаны с проблемами Гражданской войны на Северном Кавказе, депортации народов в период Великой Отечественной войны, национально-государственного

строительства народов Северного Кавказа, национальной политики и федеративного устройства РСФСР и СССР. Работа В. Д. Дзидзоева «Малоизвестные страницы истории Гражданской войны на Северном Кавказе» была удостоена малой серебряной медали. В 1979 г. он поступил в аспирантуру СОГУ на кафедру истории СССР. Кандидатская диссертация «Печать республик Северного Кавказа в пропаганде интернационализма и патриотизма в годы 8-й и 9-й пятилеток» защищена в 1982 г. в Тбилиси в Институте истории, археологии и этнографии АН Грузии. В 1990 г. поступил в докторантуру Ленинградского (ныне Санкт-Петербургского) государственного университета на кафедру истории СССР. В этом университете успешно защищена докторская диссертация «Национальная политика СССР, межнациональные отношения и национальные движения на Кавказе».

Спектр научных интересов Валерия Дударовича охватывает проблемы Гражданской войны и межнациональных отношений.

В. Д. Дзидзоев является автором более 500 научных работ. Среди них более 30 монографий. Он член Союза журналистов СССР и Российской Федерации, победитель и призер республиканских конкурсов Союза журналистов Кабардино-Балкарской Республики. Его научные работы издавались на осетинском и русском языках в различных городах Осетии, а также Москвы, Ленинграда, Ростова-на-Дону. Они публиковались также на азербайджанском, грузинском, польском и немецком языках.

В. Д. Дзидзоев – талантливый наставник молодых ученых. Под его руководством успешно защищены более 50 кандидатских диссертаций. Валерий Дударович многие годы входил в диссертационные советы Северной Осетии, Кабардино-Балкарии и Краснодарского края. Ученики Валерия Дударовича работают в научных и образовательных учреждениях Северного Кавказа и страны.

В. Д. Дзидзоев является создателем и руководителем «Научной школы историков-кавказоведов и этнополитических конфликтологов»¹, воспитавшей 50 кандидатов и докторов наук.

¹Ведущие научные школы («Российские научные школы»). Т. XIV. М.: Академия Естествознания, 2021. С. 30–31.

Он заместитель главного редактора журнала ВАК «Вестник Владикавказского научного центра РАН».

Трудно перечислить все аспекты и все основные направления, в которых В. Д. Дзидзоев оставил заметный след. В науке ему присуща объективность. Разрабатывая проблему национальной политики государства и межнациональных отношений на Кавказе, В. Д. Дзидзоев уделяет пристальное внимание не только глобальным вопросам в этой сфере, но и отдельным штрихам, которые важны на Северном Кавказе. Этой сложной проблеме он посвятил ряд своих работ: «Диалектика единства и братства»², «Национальная политика: уроки опыта»³, «Национальные отношения на Кавказе»⁴ и др. В своих исследованиях автор анализирует проблемы национальной политики, межнациональных отношений, национально-государственного строительства на Кавказе и наиболее актуальные вопросы современного федерализма.

В. Д. Дзидзоев большое внимание уделяет проблемам Конституции Российской Федерации, федеративному устройству и национальным аспектам в многонациональной стране. Этим вопросам посвящена монография «Конституция Российской Федерации и проблемы федерализма»⁵. В. Д. Дзидзоев проявил профессиональный интерес и к такой актуальной проблеме, как террор на Северном Кавказе в период Гражданской войны. Ученый издал монографию под названием «Белый и красный террор на Северном Кавказе в 1917–1918 гг.»⁶. Эта тема не утратила своей актуальности и сегодня.

Особого внимания заслуживает монография «Кавказ конца XX века: тенденции этнополитического развития (историко-политическое исследование)», в которой автор анализирует грузино-осетинские отношения сквозь призму детального исследования межнациональных отношений на Кавказе. Уникальные архивные материалы позволили представить и проанализировать положение народов Кавказа в период Кавказской войны. Автор открывает новые страницы взаимоотношений турок-месхетинцев и ногайцев.

Фальсификация истории, особенно в сфере национальной политики и практики в нашей стране, является серьезной проблемой, а монография В. Д. Дзидзоева представляет собой, с одной стороны, критику параисториков, а с другой – на высоком академическом уровне анализ различных вопросов истории Кавказа.

Валерий Дударович как честный и принципиальный ученый-историк критически подходит к анализу имеющейся литературы и источников, поскольку отдает себе отчет в том, что поверхностная или частичная интерпретация исторических фактов может стать инструментом политической игры и причиной межнациональных конфликтов. Важной в работах В. Д. Дзидзоева является полидисциплинарность исследований, которая позволяет получить более объективные и разноплановые выводы, коррелирующие друг с другом.

Сегодня его научная и преподавательская деятельность связана с Южной Осетией. Приглашение В. Д. Дзидзоева в государственный университет г. Цхинвала обусловлено его высоким профессионализмом в научно-образовательной деятельности.

²Дзидзоев В. Д. Диалектика единства и братства. Нальчик: Эльбрус, 1990.

³Дзидзоев В. Д. Национальная политика: уроки опыта. Владикавказ: Алания, 1994.

⁴Дзидзоев В. Д. Национальные отношения на Кавказе. Владикавказ: Ир, 1995.

⁵Дзидзоев В. Д., Гонов А. М. Конституция Российской Федерации и проблемы федерализма. Нальчик: Эльбрус, 1995.

⁶Дзидзоев В. Д. Белый и красный террор на Северном Кавказе в 1917–1918 гг. Владикавказ: Изд-во СОГУ, 1997 (монография по причине особой актуальности была в 2000 г. переиздана в издательстве «Алания»).

Дорогой Валерий Дударович! Коллектив Кабардино-Балкарского научного центра РАН сердечно поздравляет Вас, замечательного ученого и прекрасного человека, с 75-летним юбилеем. Ваши работы по политической истории и конфликтологии вошли в золотой фонд кавказологии. Много сил, организаторского таланта потрачено Вами на выявление, изучение, анализ неопубликованных архивных материалов. Мы высоко ценим Ваш труд ученого, работу в качестве заместителя главного редактора «Вестника Владикавказского научного центра РАН». Вы заслуженный деятель науки Республики Северная-Осетия – Алания, Республики Южная Осетия, Кабардино-Балкарской Республики и Республики Дагестан. Своим вкладом в науку Вы по праву достигли высокого признания.

В этот знаменательный день желаем Вам здоровья, новых творческих успехов, радости, огромного счастья и долгих лет жизни!

Материал подготовили:

Улаков Махти Зейтунович – доктор филологических наук, профессор, главный научный сотрудник сектора карачаево-балкарского языка Института гуманитарных исследований – филиала Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук (ИГИ КБНЦ РАН);

Шоожева Наталья Анатольевна – доктор политических наук, ведущий научный сотрудник Центра социально-политических исследований КБНЦ РАН

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ, ПРЕДСТАВЛЯЕМЫХ АВТОРАМИ В ЖУРНАЛ «ИЗВЕСТИЯ КАБАРДИНО-БАЛКАРСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РАН»

1. Журнал «Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН» публикует оригинальные научные, обзорные, аналитические статьи отечественных и зарубежных авторов, рецензии на книги и статьи, персоналии по следующим группам специальностей:

1.1. Математика и механика; 1.2. Компьютерные науки и информатика; 1.3. Физические науки; 1.6. Науки о Земле и окружающей среде; 2.3. Информационные технологии и телекоммуникации; 4.1. Агрономия, лесное и водное хозяйство; 4.2. Зоотехния и ветеринария; 5.2. Экономика; 5.4. Социология; 5.5. Политические науки; 5.6. Исторические науки; 5.9. Филология.

Журнал предназначен для научных работников, преподавателей, аспирантов, магистрантов, студентов. Периодичность – шесть выпусков в год. Журнал публикует статьи на русском и английском языках объемом не менее 8 и не более 20 страниц макетного формата (не менее 18 000 символов). Работы, превышающие объем, принимаются к публикации по специальному решению главного редактора журнала.

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по научным специальностям и соответствующим им отраслям науки, категория журнала – К2 (распределение журналов по категориям, п. 1358):

группа специальностей 2.3. Информационные технологии и телекоммуникации:

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки),

2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки),

2.3.7. Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования (физико-математические науки),

2.3.8. Информатика и информационные процессы (технические науки);

группа специальностей 4.1. Агрономия, лесное и водное хозяйство:

4.1.1. Общее земледелие и растениеводство (сельскохозяйственные науки),

4.1.2. Селекция, семеноводство и биотехнология растений (сельскохозяйственные науки),

4.1.3. Агрохимия, агропочвоведение, защита и карантин растений (сельскохозяйственные науки);

группа специальностей 5.2. Экономика:

5.2.2. Математические, статистические и инструментальные методы в экономике (экономические науки),

5.2.3. Региональная и отраслевая экономика (экономические науки),

5.2.6. Менеджмент (экономические науки).

2. К публикации в журнале «Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН» принимаются статьи, содержащие новые результаты. Статьи должны быть посвящены актуальным проблемам науки, содержать четкую постановку цели и задач исследования, строгую научную аргументацию, обобщения и выводы, представляющие интерес своей новизной, научной и практической значимостью. Журнал также публикует специальные выпуски, посвященные конференциям разного уровня по тематике журнала, обзорные статьи. Не допускается направление в редакцию статей, уже опубликованных или посланных на публикацию в другие журналы. Результаты иных авторов, использованные в статье, следует должным образом отразить в ссылках. Представляя статью в журнал, авторы обязаны выполнять все требования по оформлению.

3. Направляя статью в журнал, каждый из авторов подтверждает, что она соответствует наивысшим стандартам публикационной этики для авторов и соавторов, разработанным COPE (Committee on Publication Ethics), см. <http://publicationethics.org/about>. Всем статьям, опубликованным в журнале, присваиваются идентификаторы цифрового объекта (DOI) для лучшего поиска и идентификации. Поступающие в редакцию статьи проходят проверку на плагиат через систему *Антиплагиат* (<https://www.antiplagiat.ru>), для принятия они должны иметь не менее 75 % уникальности текста.

4. Принятые к публикации в журнале «Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН» статьи проходят двойное слепое рецензирование, редакционную подготовку, после чего макет направляется на корректуру. Окончательный вариант предоставляется автору на вычитку. Срок предоставления статьи на вычитку автору – 3 рабочих дня.

5. Полнотекстовые версии статей, публикуемых в журнале, размещаются в Интернете в свободном доступе на официальном сайте журнала <https://www.kbncran.ru/izvestiya-hm/>, на сайте Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU, Научной электронной библиотеки «Киберленинка», в Российской государственной библиотеке, ВИНТИ, Google Scholar, Российском центре научной информации (РЦНИ). Статьи по сельскому хозяйству размещаются в AGRIS. Статьи по математике, физике, информатике, математическому моделированию в экономике и по наукам о земле размещаются на Общероссийском математическом портале Math-Net.Ru www.mathnet.ru (<http://www.mathnet.ru/php/journal.phtml?jmid=izkab&optionlang=rus>). Срок размещения редакцией очередного номера журнала – в течение 3 месяцев с даты выхода в свет номера.

6. Публикации в журнале для сотрудников КБНЦ РАН бесплатные, для сторонних авторов – 500 руб. за страницу. Для рецензентов (не членов редколлегии) предусмотрены льготы для опубликования.

7. Требования к рукописи статьи.

Рукопись статьи подается вместе с сопроводительным письмом, подписанным всеми авторами статьи, в котором авторы в том числе подтверждают, что подаваемая в журнал статья ранее не была опубликована, а также не представлена для рассмотрения и публикации в другом журнале. Число и состав авторов после подачи статьи на рецензирование не меняются.

Материалы предоставляются в редакцию журнала по адресу: 360010, Россия, Кабардино-Балкарская Республика, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2 или на электронную почту ired07@mail.ru.

Все страницы, включая рисунки, таблицы и список литературы, следует пронумеровать.

В тексте статьи **обязательно** указывается:

- УДК <https://teacode.com/online/udc/>; ORCID; тип статьи (научная, обзорная, аналитическая,...); коды JEL (специальности: 5.2.2. Математические, статистические и инструментальные методы в экономике, 5.2.3. Региональная и отраслевая экономика, 5.2.6. Менеджмент); AMS Subject Classification (по специальностям в областях математики, информатики, физики);

- название статьи на русском и английском языках;

- фамилия и инициалы автора (авторов) на русском и английском языках; электронная почта авторов (если несколько авторов, то указать * автора, ответственного за переписку);

- полное официальное название учреждения с указанием полного почтового адреса на русском и английском языках, адрес электронной почты (E-mail) **организации**;

- аннотация на русском и английском языках – в ней четко должны отражаться актуальность, новизна, методика и результаты научного исследования, выводы, объем – 150–200 слов;

- ключевые слова на русском и английском языках – не более 10–15 слов;

- основной текст статьи (структура): введение, цели и задачи исследования, методы исследования, результаты исследования, выводы (заключение);

- финансирование;

- вклад авторов.

В аннотации и заключении не допускается использование громоздких формул, ссылок на текст работы или список литературы.

Сведения об авторах (на русском и английском языках): фамилия, имя, отчество, ученая степень, ученое звание, должность, название подразделения, полное название места работы (может быть более одного), рабочий адрес, ORCID, SPIN-код E-library.

Для связи с редакцией – **контактный телефон** одного из авторов.

8. Список литературы должен содержать только ссылки на научные статьи (периодические журналы, монографии, труды конференций и т.д.), которые упоминаются в тексте работы, расположенные в порядке цитирования, не менее 15. Ссылки на неопубликованные работы, результаты которых используются в доказательствах, не допускаются. Недопустимо использование ссылок на авторефераты, диссертации, газеты, интернет-сайты журналов, электронные газеты. Список литературы печатается в конце статьи, оформляется в соответствии с правилами, предусмотренными журналом. Все остальные источники, использованные при написании статьи, выносятся в сноски в конце каждой страницы (при необходимости). В списке литературы необходимо указывать не менее 50 % от общего количества источников за последние 5 лет (как самого автора, так и сторонних авторов, работающих в данном направлении; в том числе зарубежных источников), не более 20 % ссылок на собственные работы. Исключение составляют статьи, которые посвящены исследованиям конкретных документов.

В списке литературы должны быть указаны источники по образцу:

• статья – Фамилия И. О. Название статьи // Название журнала. Год. Том. Номер. С. ...-... DOI...

• книга – Фамилия И. О. Название книги: монография. Город: Издательство, Год. ... с.

• коллективная монография – Фамилия И. О. Название книги / под ред. Фамилия И. О. Город: Издательство, Год. ... с.

• статья в сборнике конференций – Фамилия И. О. Название статьи // Название конференции: материалы конференции * / Название организации. Город, Год. С. ...-... DOI...

• статья в электронном издании – Фамилия И. О. Название статьи [Электронный ресурс] // Название журнала, Год. Том. Номер. С. ...-... URL:... (дата обращения: число, месяц, год).

9. Список литературы **полностью** дублируется на **английском языке** независимо от того, имеются в нем иностранные источники или нет.

Пояснения по формированию Списка литературы и References.

Если статья, на которую указывает ссылка, была переведена на английский язык и опубликована в английской версии журнала, необходимо указывать ссылку из переводного источника! Указания (учебное пособие, монография, перевод, количество томов и т.д.) в References можно опускать. При цитировании оригинального источника на английском языке в названии с прописной буквы пишется первое слово. В названии журнала пишется каждое полноразличное слово с прописной буквы.

Библиографические описания публикаций в References составляют в следующей последовательности:

журнальная статья

Author A.A., Author B.B., Author C.C. Title of article. *Zaglavie jurnala* [Title of Journal]. Year. Vol. ... No. ...iss. ... Pp. ...-... DOI (In Russian);

в случае, если у журнала есть официальное название на английском языке, источник оформляется в таком виде:

Author A.A., Author B.B., Author C.C. Title of article. *Title of Journal*. Year. Vol. ... No. ...iss. ... Pp. ...-... DOI (In Russian);

монография, книга, глава из книги, препринт

Author A.A., Author B.B., Author C.C. *Nazvanie* [Title of book]. Gorod: Izdanie. Year. Pages p. (In Russian);

статья в материалах конференции

Author A.A., Author B.B., Author C.C. Title of paper. *Nazvanie konferensii*. Gorod, Organizacia. Year. Pages p. (In Russian);

статья в электронном издании

Author A.A., Author B.B., Author C.C. Title of paper. *Nazvanie zhurnala*, Year, Pages p., available at: <http://...> (accessed Data Year).

На сайте <http://translit-online.ru/> можно бесплатно воспользоваться программой транслитерации русского текста в латиницу.

10. Требования к электронному носителю:

- к статье прилагается электронный вариант в формате Microsoft Office Word 2007, Windows XP, Windows 7, 10;

- статья должна быть набрана в формате A4 с полями: верхнее и нижнее – 2,0 см; левое – 2,5 см; правое – 2 см, шрифтом Times New Roman, размер 14, полуторный интервал;

- таблицы, алгоритмы, рисунки, схемы и т.п. должны быть редактируемые и выполнены в формате A4 книжной ориентации;

- формулы должны быть набраны в программе MathType, нумеровать следует те формулы, на которые есть ссылки в тексте статьи.

11. Решение о публикации или отклонении авторских материалов принимается редколлегией в соответствии с правилами рецензирования статей. Для экспертной оценки статей привлекаются ведущие специалисты по основным научным направлениям (рубрикам) выпуска журнала.

12. Редакция не вступает в дискуссию с авторами отклоненных материалов.

13. В каждом выпуске публикуется, как правило, не более одной статьи одного и того же автора. Решение о публикации более одного материала принимается редакционной коллегией и главным редактором журнала.

14. Статьи, оформленные без соблюдения указанных правил, не рассматриваются.

FORMATTING RULES FOR ARTICLES TO BE SUBMITTED BY AUTHORS TO THE JOURNAL "NEWS OF THE KABARDINO-BALKARIAN SCIENTIFIC CENTER OF RAS"

1. The journal "News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS" publishes original scientific, review, analytical articles by domestic and foreign authors, reviews of books and articles, personalities in the following groups of specialties:

1.1. Mathematics and Mechanics; 1.2. Computer Science and Informatics; 1.3. Physical Sciences; 1.6. Earth and Environmental Sciences; 2.3. Information Technologies and Telecommunications; 4.1. Agronomy, Forestry and Water Management; 4.2. Zootechnics and Veterinary Medicine; 5.2. Economics; 5.4. Sociology; 5.5. Political Sciences; 5.6. Historical Sciences; 5.9. Philology.

The journal is intended for researchers, teachers, postgraduate students, undergraduates, students. Frequency – six issues per year. The journal publishes articles in Russian and English with a volume of no less than 8 and no more than 20 pages of the layout format (at least 18 000 characters). Papers exceeding that volume may be accepted for publication by special decision of the Editor-in-chief of the journal.

The journal is included in the List of peer-reviewed scientific publications in which the main scientific results of dissertations for the degree of Candidate of Science, for the degree of Doctor of Science in scientific specialties and their respective branches of science should be published, category of the journal – K2 (distribution of journals according to categories, par. 1358):

group of specialties 2.3. Information technology and telecommunications:

2.3.1. System analysis, management and information processing, statistics (technical sciences),

2.3.3. Automation and control of technological processes and productions (technical sciences),

2.3.7. Computer modeling and design automation (physical and mathematical sciences),

2.3.8. Informatics and information processes (technical sciences);

group of specialties 4.1. Agronomy, forestry and water management:

4.1.1. General farming and crop production (agricultural sciences),

4.1.2. Breeding, seed production and plant biotechnology (agricultural sciences),

4.1.3. Agrochemistry, agrosoil science, plant protection and quarantine (agricultural sciences);

group of specialties 5.2. Economy:

5.2.2. Mathematical, statistical and instrumental methods in economics (economic sciences),

5.2.3. Regional and sectoral economics (economic sciences),

5.2.6. Management (economic sciences).

2. Articles are accepted for publication in the journal "News of the Kabardino-Balkarian scientific center of RAS" if they contain new results. Articles should be devoted to topical problems of science, contain a clear statement of the goal and objectives of the study, rigorous scientific argumentation, generalizations and conclusions that are of interest for their novelty, scientific and practical significance. The journal also publishes special issues devoted to conferences of various levels on the subjects of the journal, review articles. It is not allowed to send to the editorial office articles that have already been published or sent for publication to other journals. The results of other authors used in the article should be duly reflected in the references. Submitting an article to the journal, authors are obliged to fulfill all the requirements of the journal for their formatting.

3. By submitting an article to the journal, each author confirms that it meets the highest standards of publication ethics for authors and co-authors, developed by COPE (Committee on Publication Ethics), see <http://publicationethics.org/about>. All articles published in the journal are assigned digital object identifiers (DOIs) for better search and identification. Articles submitted to the editorial office are checked for plagiarism through the **Antiplagiat** system (<https://www.antiplagiat.ru>); for acceptance they must have at least 75 % of the uniqueness of the text.

4. Articles accepted for publication in the journal "News of the Kabardino-Balkarian scientific center of RAS" undergo double blind peer review, editorial preparation, after which the final layout is sent for correction. The final version is provided to the author for proofreading. The time period for submitting the article to the author for proofreading is 3 working days.

5. Full-text versions of articles published in the journal are posted on the Internet in free access on the official website of the Scientific Electronic Library eLIBRARY.RU, Scientific electronic library "Cyberleninka", in the Russian state library, VINITI, Google Scholar. Russian Center for Scientific Information (RCSI). Articles on agriculture are posted on AGRIS. Articles on mathematics, physics, computer science, mathematical modeling in economics and geosciences are posted on the All-Russian portal Math-Net.Ru www.mathnet.ru (https://www.mathnet.ru/php/journal.phtml?jmid=izkab&option_lang=eng). The time for posting of the journal in the web must be within 3 months from the date of issue.

6. Publications in the journal for KBSC RAS employees are free, for outside authors – 500 rubles per page. For reviewers (not members of the editorial board) privileges for publication are provided.

7. Requirements for the manuscript of the article.

The manuscript of the article is submitted together with a covering letter signed by all authors of the article, in which the authors, among other things, confirm that the article submitted to the journal has not been previously published, and has not been submitted for consideration and publication in another journal. The number and composition of authors does not change after submitting an article for reviewing.

Materials are submitted to the Editorial and Publishing Department: 360010, Russia, Kabardino-Balkarian Republic, Nalchik, Balkarov street, 2, or email: ired07@mail.ru.

All pages, including figures, tables and references, should be numbered.

The following indications in the text of the article are **mandatory**:

- UDC <https://teacode.com/online/udc/>; ORCID; type of article (scientific, review, analytical, ...); JEL codes (specialty 5.2.2. Mathematical, statistical and instrumental methods in Economics, 5.2.3. Regional and sectoral economics, 5.2.6. Management); AMS Subject Classification (in the fields of mathematics, computer science, physics);

- the title of the article in Russian and English;

- surname and initials of the author(s) in Russian and English; e-mail of authors (if there are several authors, then indicate * the author responsible for the contact correspondence);

- the full official name of the institution, indicating the full postal address in Russian and English, the electronic mail address (E-mail) of the **organization**;

- abstract in Russian and English – it should clearly reflect the novelty, relevance and methodology and results of scientific research, conclusions, volume is no more than 150–250 words;

- keywords in Russian and English – no more than 10–15 words;

- main text of the article (structure): introduction, goals and objectives of the research, research methods, research results, conclusions;

- financing;

- contribution of the authors.

The abstract and conclusion should not contain cumbersome formulas, references to the text of the work or the list of references.

Information about the authors (both in Russian and English): last name, first name, patronymic, academic degree, academic title, position, department name, full name of the place of work (there may be more than one), work address, contact phone number, ORCID, SPIN-code E-library.

The contact phone number of one of the authors to contact the editorial office.

8. The list of references should contain only links to scientific articles (periodicals, monographs, conference proceedings, etc.) to which there are references in the text of the work, arranged in the order of citation, not less than 15. References to unpublished works, the results of which are used in the proofs, are not allowed. It is unacceptable to use links to abstracts, dissertations, newspapers, websites of journals, electronic newspapers. The list of references is printed at the end of the article, drawn up in accordance with the rules provided by the journal. All other sources used in the article are placed in footnotes at the end of each page (if necessary). At least 50 % of the total number of sources in the list of references should be of the last 5 years (both the author's himself and other authors working in this direction as well as foreign sources) and not more than 20 % references to own works. The exception is made for articles that are devoted to the study of specific documents.

In the list of references, sources should be indicated according to the sample:

- article – Surname and initials of the name and patronymic. Title of the article // Title of the journal. Year. Volume. Number. Pp. ... - ... DOI ...

- book – Surname and initials of the name and patronymic. Book title: monograph. City: Publisher, Year. ... p.

- collective monograph – Surname and initials of the name and patronymic. Title of the book. editor – Surname and initials of the name and patronymic. City: Publisher, Year. ... p.

- article in the collection of conference materials – Surname and initials of the name and patronymic. Title of the article // Title of the conference: materials of the conference * / Name of the organization. City, Year. Pp. ... - ... DOI

- article in the electronic edition – Surname and initials of the name and patronymic, The title of the article [Electronic source] // Journal name, Year. Volume. Number. Pp.... -... URL:... (date of access: date, month, year).

9. The list of references is **fully** duplicated in **English**, regardless of whether it contains foreign sources or not.

Explanations on the formation of the list of literature and References.

If the article to which the reference points was translated into English and published in the English version of the journal, you must provide the link from the translated source! Descriptions (tutorial, monograph, translation, number of volumes, etc.) in References may be omitted. When citing an original source in English, the first word is capitalized in the title. Each full-valued word is capitalized in the title of the journal.

Bibliographic descriptions of publications in References are in the following sequence:

journal article

Author A.A., Author B.B., Author C.C. Title of article. *Zaglavie jurnala* [Title of Journal]. Year. Vol. ... No. ...iss. ... Pp. ...-... DOI (In Russian);

if the journal has an official name in English, then the reference is formatted in the following way:

Author A.A., Author B.B., Author C.C. Title of article. *Title of Journal*. Year. Vol. ... No. ...iss. ... Pp. ...-... DOI (In Russian);

monograph, book, chapter from a book, preprint

Author A.A., Author B.B., Author C.C. *Nazvanie* [Title of book]. Gorod [City], Izdanie [Publisher]. Year. Pages p. (In Russian);

article in conference materials

Author A.A., Author B.B., Author C.C. Nazvanie [Title of paper]. *Nazvanie konferensii* [Title of the conference]. Gorod [City], Organizacia [Organization]. Year. Pages p. (In Russian);

article in electronic edition

Author A.A., Author B.B., Author C.C. Title of paper. *Nazvanie zhurnala*, Year, Pages p., available at: <http://...> (accessed Data Year).

On the site <http://translit-online.ru/> you can use the program of transliteration of the Russian text into the Latin alphabet for free.

10. Requirements for electronic media:

- an electronic version in the format of Microsoft Office Word 2007, Windows XP, Windows 7, 10 is attached to the article;
- the article should be typed in A4 format with margins: top and bottom – 2.0 cm; left – 2.5 cm; right – 2 cm, the article should be typed in Times New Roman, size 14, one and a half spacing;
- editable tables, algorithms, figures, diagrams, etc. must be in A4 format, portrait orientation;
- Equations must be typed using the MathType program and equations that are referenced in the text should be numbered.

11. The decision to publish or reject author(s) materials is made by the editorial board in accordance with the rules for reviewing articles. Leading experts in the main scientific directions (headings) of the journal are involved in the expert assessment of the articles.

12. The editorial office does not enter into discussions with the authors of the rejected materials.

13. As a rule no more than one article by one and the same author is published in an issue. The decision to publish more than one material is made by the editorial board and the chief editor of the journal.

14. Articles violating these formatting rules are not considered.

Научный журнал

ИЗВЕСТИЯ КАБАРДИНО-БАЛКАРСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РАН

Том 27 № 2 2025

Сквозной номер выпуска – 124

Журнал входит в «Перечень рецензируемых научных изданий,
в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций
на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук»

Зав. редакционно-издательским отделом КБНЦ РАН – *А. М. Бейтуганова*

Компьютерная верстка – *А. И. Токова*

Техническое редактирование – *А. И. Токова*

Корректор – *Л. Б. Канукоева*

Перевод – *Д. Г. Макоева*

ISSN 1991-6639



Подписано в печать 21.04.2025 г. Дата выхода в свет: 30.04.2025 г.

Формат бумаги 60x84 ¹/₈. Бумага офсетная.

Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 24,41. Тираж 300 экз.

Цена свободная

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-14936 от 20 марта 2003 г. выдано Министерством
Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций

Учредитель: Кабардино-Балкарский научный центр РАН

Адрес редакции и издателя: 360010, КБР, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2

Отпечатано в редакционно-издательском отделе КБНЦ РАН по адресу:
360010, КБР, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2



DOI: 10.35330/1991-6639